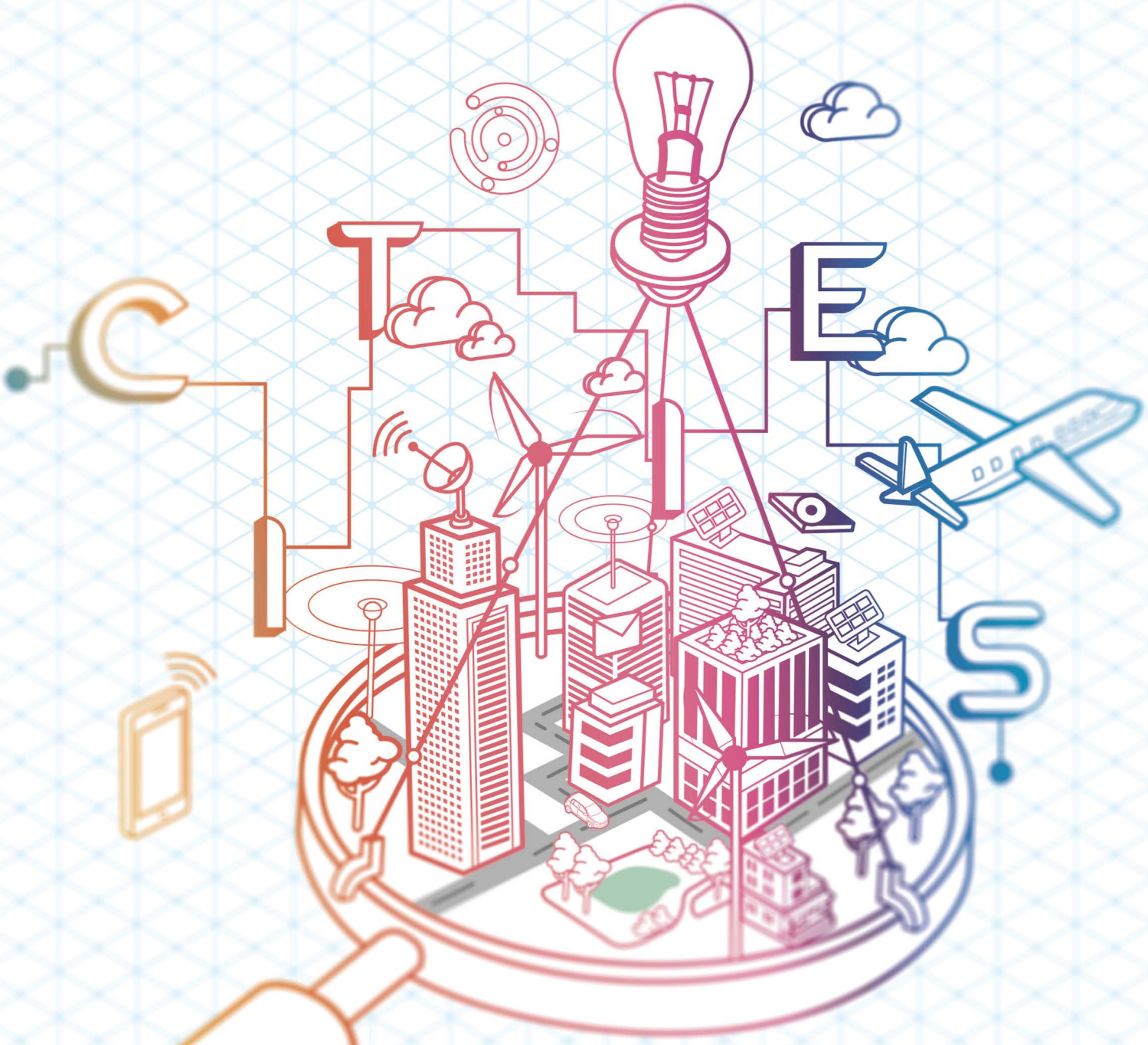
CIUDADES INTELIGENTES

TOTALMENTE INTEGRALES, EFICIENTES Y SOSTENIBLES



VIGILADA MINEDUCACIÓN
USC UNIVERSIDAD SANTIAGO DE CALI
EDITORIAL

UVa

CIUDADES INTELIGENTES

TOTALMENTE INTEGRALES, EFICIENTES Y SOSTENIBLES

CIUDADES INTELIGENTES

TOTALMENTE INTEGRALES, EFICIENTES Y SOSTENIBLES

I Ibero-American Congress of Smart Cities (ICSC-CITIES 2018)

Soria,
Spain September 26th to 27th,
2018

Proceedings

CITIES
CIUDADES INTELIGENTES TOTALMENTE INTEGRALES, EFICIENTES Y SOSTENIBLES

PROGRAMA IBEROAMERICANO
CYTED
CIENCIA Y TECNOLOGÍA PARA EL DESARROLLO

UVa

VIGILADA MINEDUCACIÓN
USC
UNIVERSIDAD SANTIAGO DE CALI
EDITORIAL

Ciudades inteligentes totalmente integrales, eficientes y sostenibles /
Luis Hernández Callejo [... y otros]. -- Editor
Edward Javier Ordoñez. -- Cali : Universidad Santiago de Cali, 2018
939 páginas : fotografías ; 17 x 24 cm.
Incluye índice de contenido
ISBN 978-958-5522-51-0
1. Ingeniería sostenible 2. Ciudades inteligentes 3. Desarrollo sostenible 4. Urbanismo I. Hernández Callejo, Luis, autor II. Ordoñez, Edward Javier, editor
624 cd 21 ed.
A1621529

CEP-Banco de la República-Biblioteca Luis Ángel Arango

CIUDADES INTELIGENTES TOTALMENTE INTEGRALES, EFICIENTES Y SOSTENIBLES

© 2018 Universidad Santiago de Cali.
©Universidad de Valladolid, España.
© I Ibero-American Congress of Smart Cities (ICSC-CITIES 2018).

© **Autores:** Luis Hernández Callejo, Claudia Zúñiga Cañón, Sergio Nesmachnow, Vicente Leite, Ângela Ferreira, Javier Prieto (coordinadores), y otros autores.

1a. Edición
Cali, Colombia - 2018
ISBN (Libro digital): 978-958-5522-51-0

Fondo Editorial
University Press Team
Carlos Andrés Pérez Galindo
Rector
Rosa del Pilar Cogua Romero
Directora General de Investigaciones
Edward Javier Ordóñez
Editor en Jefe

Comité Editorial
Editorial Board
Rosa del Pilar Cogua Romero
Monica Chávez Vivas
Edward Javier Ordóñez
Luisa María Nieto Ramírez
Sergio Molina Hincapie
Saúl Rick Fernández Hurtado
Sergio Antonio Mora Moreno
Francisco David Moya Cháves

Diseño y concepto gráfico
Juan Diego Tovar Cardenas
Universidad Santiago de Cali
Tel. 5183000 - Ext. 322
Cel. 301 439 7925

Distribución y Comercialización
Universidad Santiago de Cali
Publicaciones
Calle 5 No. 62 - 00
Tel: 518 3000, Ext. 323 - 324 - 414

La editorial de la Universidad Santiago de Cali se adhiere a la filosofía del acceso abierto y permite libremente la consulta, descarga, reproducción o enlace para uso de sus contenidos, bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 4.0 Internacional. http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/

Coordinators
Conference Chairs



Dr. Luis Hernández Callejo
Universidad de Valladolid (Spain)



Dr. Vicente Leite
Instituto Politécnico de Braganza (Portugal)



Dra. Claudia Liliana Zúñiga Cañón
Universidad Santiago de Cali (Colombia)



Dr. Javier Prieto
Universidad de Salamanca (España)



Dr. Sergio Nesmachnow
Universidad de la República (Uruguay)



Dra. Ângela Ferreira
Instituto Politécnico de Braganza (Portugal)

About The Conference

Smart Cities are the result of the increasingly urgent need to orient our lives towards sustainability. Therefore, these cities use infrastructure, innovation and technology to reduce energy consumption and CO_2 emissions, in order to improve the quality of life of their citizens.

Being a strategic issue that brings new challenges, the organizers request participation in the **I Ibero-American Congress of Smart Cities (ICSC-CITIES 2018)**, which will be a discussion forum that will create synergies among different research groups to favor the development of Smart Cities, and contribute to their knowledge and integration in different scenarios, their possible development and the strategies to address them.

ICSC-CITIES 2018 will take place on September 26-27, 2018 in the Auditorium of University of Valladolid (UVa), Duques de Soria Campus (Soria, Spain), with the sponsorship of the **Ibero-American Program of Science and Technology for Development (CYTED)**.

Articles written in English submitted to the conference will be considered for publication in the **conference proceedings at Springer Communications in Computer and Information Science (CCIS)**. In addition, authors of selected articles will be invited to expand their contribution for publication in a **Special Issue of the Journal of the University of Antioquia** (indexed in Scopus Q3 and Web of Science ESCI), to be published with IEEE ColCom.

Welcome from the local committee

We are pleased to welcome you to the I Ibero-American Congress of Smart Cities (ICSC-CITIES 2018). The forum for the latest achievements in *Smart Cities* is visiting this year the town of Soria (Spain), which is rich in ancient traditions, architectural and cultural heritage in Spain.

The technical program has been carefully designed to offer a fresh and balanced selection of advances and results in topics, encouraging the presence of fresh and interdisciplinary topics. The proposals for the conference should be based on the subject areas that have been defined by the Conference's Committee of Experts:

- Energetic Efficiency and Sustainability.
- Infrastructures, Energy and the Environment.
- Mobility and IoT.
- Governance and Citizenship.

In addition, an attractive social program is proposed among a sample of selected interesting places. The Welcome Reception will take place at Auditorium of University of Valladolid (UVa), Duques de Soria Campus (Soria, Spain) on Wednesday 26th. Besides, the Gala Dinner will be at the Hotel Leonor Mirón on Wednesday 26th, and on Thursday 27th will be a guided visit to the main monuments in Soria.

We are really thankful to all members of the Organizing Committee for their continuous help to organize every de- tail of this outstanding conference. Finally, we are in debt to the more than 115 members of Technical Program Committee (TPC) for their hard and anonymous work to care for the highest quality of papers and splendid coordi- nation of TPC Chairs.

Sincerely hoping you enjoy ICSC-CITIES 2018 in Soria and this experience to last in your memory for a long time, receive our warmest welcome.

Dr. Luis Hernández Callejo
Dra. Claudia Zúñiga Cañón
Dr. Sergio Nesmachnow
Dr. Vicente Leite
Dra. Ângela Ferreira
Dr. Javier Prieto

Supporting companies

Organizing Committee

Adriana Correa - Universidad de Valladolid (Spain)

Ángel L. Zorita - Universidad de Valladolid (Spain)

Antonio M. Gascó - Universidad de Valladolid (Spain)

Begoña Asenjo Martín - Universidad de Valladolid (Spain)

Daniel Moríñigo - Universidad de Valladolid (Spain)

Daphne Hermosilla - Universidad de Valladolid (Spain)

Epifanio Díez - Universidad de Valladolid (Spain)

Ignacio de Godos - Universidad de Valladolid (Spain)

Jesús M. Vegas - Universidad de Valladolid (Spain)

Lilian J. Obregón - Universidad de Valladolid (Spain)

Luis Hernández Callejo - Universidad de Valladolid (Spain)

Manuel A. González - Universidad de Valladolid (Spain)

Oscar Duque - Universidad de Valladolid (Spain)

Pablo Jiménez Rodríguez - Universidad de Valladolid (Spain)

Teodoro Calonge - Universidad de Valladolid (Spain)

Víctor Alonso Gómez - Universidad de Valladolid (Spain)

Technical Program Committee

Adolfo Ruelas
Universidad Autónoma de Baja California (México)

Adriana Correa Guimaraes
Universidad de Valladolid (Spain)

Albert Rego
Universitat Politècnica de València (Spain)

Alberto López
Diputación de Ávila (Spain)

Alberto del Barrio García
Universidad Politécnica de Madrid (Spain)

Alejandro Otero
Universidad de Buenos Aires (Argentina)

Alejandro Sabolansky
Universidad Nacional de la Plata (Argentina)

Alexis Acuña
Universidad Autónoma de Baja California (México)

Ana Ruíz
Universidad de San Jorge (Spain)

Andrei Tchernykh
CICESE Research Center (México)

Andrés Adolfo Navarro Newball
Pontificia Universidad Javeriana, Cali (Colombia)

Ángel M. García Pedrero
Universidad de Valladolid (Spain)

Ângela Ferreira
Polytechnical Institute of Bragança (Portugal)

Aníbal León
Universidad Autónoma de Baja California (México)

Antonio Javier García Sánchez
Universidad Politécnica de Cartagena (Spain)

Beethoven Zuleta
Universidad de Valladolid (Spain)

Carlos Meza Benavides
Costa Rica Institute of Technology (Costa Rica)

Carlos A. Méndez
INTEC (UNL-CONICET) (Argentina)

César Llamas
Universidad de Valladolid (Spain)

Claudia L. Zúñiga Cañón
Universidad Santiago de Cali (Colombia)

Claudia P. Murcia Zorrilla
Universidad Cooperativa de Colombia (Colombia)

Cleonilson Protasio
Federal University of Paraíba (Brasil)

Cristina Sáez Blázquez
Universidad de Salamanca (Spain)

Daniel Moríñigo Sotelo
Universidad de Valladolid (Spain)

Daphne Hermosilla
Universidad de Valladolid (Spain)

David Chinarro
Universidad de San Jorge (Spain)

Diego Loaiza
Universidad Santiago de Cali (Colombia)

Diego Vilches Antao
Universidad Nacional de la Plata (Argentina)

Diego González Aguilera
Universidad de Salamanca (Spain)

Diego Alberto Godoy
Universidad Gastón Dachary (Argentina)

Diego Fernando Marín
Universidad Libre, Cali (Colombia)

Diego Gabriel Rossit
Universidad Nacional del Sur (Argentina)

Edgardo Aníbal
Universidad Gastón Dachary (Argentina)

Eduardo Sosa
Universidad Gastón Dachary (Argentina)

Esteban Mocskos
Universidad de Buenos Aires (Argentina)

Estefanía Alfaro
Universidad del Valle (Colombia)

Euler Cássio Tavares de Macedo
Federal University of Paraíba (Brasil)

Fabián Castillo Peña
Universidad Libre, Cali (Colombia)

Fabián Favret
Universidad Gastón Dachary (Argentina)

Fabricio Carvalho
Federal University of Paraíba (Brasil)

Félix Santos García
CEETA (Cuba)

Fernando Vélez Varela
Universidad Libre, Cali (Colombia)

Francisco Valbuena
Universidad de Valladolid (Spain)

Francisco David Moya
Universidad Santiago de Cali (Colombia)

Francisco Javier Finat Codes
Universidad de Valladolid (Spain)

Fredy Vélez
CARTIF (Spain)

Gregorio López
Universidad Politécnica de Madrid (Spain)

Guadalupe Ramos Truchero
Universidad de Valladolid (Spain)

Hortensia Amarís
Universidad Carlos III de Madrid (Spain)

Ignacio Martín Nieto
Universidad de Salamanca (Spain)

Itziar Angulo
University of the Basque Country (Spain)

Iván García Magariño
Universidad de Zaragoza (Spain)

Jaime Lloret Mauri
Universitat Politècnica de València (Spain)

Javier Prieto
Universidad de Salamanca (Spain)

Javier Rocher
Universitat Politècnica de València (Spain)

Jesús Vegas
Universidad de Valladolid (Spain)

Jorge Mírez
Universidad Nacional de Ingeniería (Perú)

Jorge J. Gómez Sanz
Universidad Complutense de Madrid (Spain)

José Aguerre
Universidad de la República (Uruguay)

José Antonio Ferrer
CIEMAT (Spain)

José Ramón Aira Zunzunegui
Universidad de Valladolid (Spain)

Juan Espinoza
Universidad de Cuenca (Ecuador)

Juan Mauricio
Federal University of Paraíba (Brasil)

Juan Peralta
Escuela Superior Politécnica del Litoral (Ecuador)

Juan De Dios Benítez
Universidad Gastón Dachary (Argentina)

Laura Fava
LINTI (Argentina)

Liliana Gutierrez Rancruel
Universidad Cooperativa de Colombia (Colombia)

Lorena Parra
Universitat Politècnica de València (Spain)

Luis Hernández Callejo
Universidad de Valladolid (Spain)

Luis Marrone
Universidad Nacional de la Plata (Argentina)

Luis Cano
CIEMAT (Spain)

Luis Hernández Callejo
Universidad de Valladolid (Spain)

Luis Claudio García Santander
Universidad de Concepción (Chile)

Luis Manuel Navas Gracia
Universidad de Valladolid (Spain)

Luisena Fernández
Universidad del Zulia (Venezuela)

Luiz Angelo Steffenel
Université de Reims Champagne-Ardenne (France)

Manuel González
Universidad de Valladolid (Spain)

Manuel Álvarez
Universidad Politécnica de Madrid (Spain)

Marcia Eugenio Gozalbo
Universidad de Valladolid (Spain)

María del Rosario Heras Celemín
CIEMAT (Spain)

María Pilar Lisbona
Universidad de Valladolid (Spain)

Miguel Rodelgo Lacruz
CUD-ENM (Spain)

Mónica Alonso
Universidad Carlos III de Madrid (Spain)

Mónica Montoya
CIDET (Colombia)

Nicolás Velasquez
Universidad Autónoma de Baja California (México)

Noelia Uribe Pérez
TECNALIA (Spain)

Noelia Soledad Pinto
Universidad Tecnológica Nacional (Argentina)

Oscar Duque Pérez
Universidad de Valladolid (Spain)

Oscar Izquierdo
CIEMAT (Spain)

Oscar Carpintero
Universidad de Valladolid (Spain)

Pablo Monzón
Universidad de la República (Uruguay)

Francisco Rodríguez
Föra Förest Technologies (Spain)

Paulo Godim
Universidad de Brasil (Brasil)

Pedro Luis González Ramírez
Universidad Central (Colombia)

Ponciano Jorge Escamilla Ambrosio
CIC-IPN (México)

Rafael Asorey Cacheda
CUD-ENM (Spain)

Renzo Massobrio
Universidad de la República (Uruguay)

Ricardo Quijano
Universidad Nacional de Colombia (Colombia)

Roberto Best Brown
Universidad Nacional Autónoma de México (México)

Roberto Villafáfila Robles
Universidad Politècnica de Catalunya (Spain)

Roberto Getino De La Mano
EREN (Spain)

Ronney Arismel Mancebo
CEFET/RJ (Brasil)

Sandra Sendra
University of Granada (Spain)

Santiago Egea Gómez
Universidad de Valladolid (Spain)

Santiago Iturriaga
Universidad de la República (Uruguay)

Santiago Hernán Bareiro
Universidad Gastón Dachary (Argentina)

Sara Gallardo Saavedra
Universidad de Valladolid (Spain)

Sergio Nesmachnow
Universidad de la República (Uruguay)

Susana Del Pozo
Universidad de Salamanca (Spain)

Teodoro Calonge
Universidad de Valladolid (Spain)

Vanessa Gimaraes
CEFET/RJ (Brasil)

Vicente Leite
Polytechnical Institute of Bragança (Portugal)

Vicente Canals
Universidad de las Islas Baleares (Spain)

Víctor Alonso Gómez
Universidad de Valladolid (Spain)

Yuri Percy Molina
Federal University of Paraíba (Brasil)

Table of Contents

Wednesday: 09/26/2018

Track 1: Energy Efficiency and Sustanaibility

Alocação e Dimensionamento de Painéis Fotovoltaicos Utilizando Otimização por Enxame de Partículas para Reduzir as Perdas Visando os Aspectos Econômicos. Alex Moreira, Clivaldo Araújo and Yuri Rodriguez **35**

A Big-data solution to combine climatic, atmospheric and soil-water dynamics data and improve green urban planning. Adrián Pascual, Rodrigo Gómez, Rafael Rivera and Susana Domínguez **50**

Aplicación de eficiencia energética y generación distribuida con micro sistemas fotovoltaicos para el uso óptimo de la energía. Napoleón Blanco **67**

Características de cisco de café peletizado y desagregado como combustible. Raiza Manrique, Daniela Vásquez, Carlos Ceballos, Farid Chejne and Andres Amell **79**

Regeneración urbana para la transformación de las ciudades en entornos más inteligentes y sostenibles: Casos de éxito en el área metropolitana de Valladolid. Fredy Velez, Miguel Garcia, Estefania Vallejo, Cecilia Sanz and Cristina de Torre **95**

Hacia una Universidad de Concepción Sustentable: Implementación de Proyectos Energéticos. Luís García Santander **110**

Propuesta de Sistema de Gestión para Recolección de Residuos Urbanos de Ciudades Inteligentes. Diego Alberto Godoy, Eduardo Sosa, Juan De Dios Benitez, Hernán Bareiro, Fabián Fabret and Edgardo Anibal Belloni **127**

Asignación de responsabilidad de las cargas en las emisiones de CO2 de centrales térmicas mediante el Método Aumann-Shapley. Carlos Castillo Correa, Yuri Molina Rodriguez and Jaime Luyo Kuong **142**

Track 3: Mobility and IoT

Data acquisition for user identification on smart buildings throughout the act of opening a door. Jesús Vegas, César Llamas, Manuel A. González and Carmen Hernández **156**

Intelligent Flexibility Management for Prosumers: Development of Algorithms for the Energy Management of Electric Vehicles, Loads, Generators and Batteries. Sara Barja-Martinez, Pol Olivella-Rosell, Pau Lloret-Gallego and Roberto Villafafila-Robles **166**

Sistema IoT para la Monitorización de Microsismicidad y Análisis de Salud Estructural en Smart Cities. Santiago González Martínez, Juan Carlos Jiménez Pacheco, Remigio Guevara Baculima and Iván Palacios Serrano Delgado del Hoyo and Javier Finat Codes **191**

Planificación Renzo de Massobrio, transporte Alfredo urbano Cristóbal and en ciudades Andrei inteligentesTchernykh. **204**
Sergio Nesmachnow

Towards the Smart Museum: Challenges from Lab Experimentation to Deployment. **219**
Borja Barinaga López, Isidro Moreno Sánchez, Gonzalo Martín Sánchez, Edmond C. Prakash, Diego F. Loaiza Buitrago, Andrés A. Navarro-Newball and Victoria E. Contreras

MUSA – I. When the bus is the thing to connect to Internet. Víctor Padrón Nápoles, **234**
Manuel de Buenaga, Diego Gachet Páez, José Luis Esteban Penelas, Alba Gutiérrez García-Ochoa, Alfonso López and Fernando Aparicio

Optimization of V2V communications using Voronoi diagrams in smart cities. **245**
Roberto Casado-Vara, Alfonso González-Briones, Fernando De la Prieta, Javier Prieto and Juan Corchado

Special Session: Governance and Citizenship

Cómo visualizar la complejidad urbana a través del impacto de los alojamientos turísticos Airbnb. José-Miguel Fernández-Güell and Iván Rodríguez-Suárez **256**

Track 2: Infrastructure, Energy and Environment

Impacto de la recarga de vehículos eléctricos en la contaminación armónica en las redes eléctricas. Oscar Duque-Perez, Angel Luis Zorita-Lamadrid, Daniel Morinigo-Sotelo, Angel Arranz-Gimon, Luis Hernandez-Callejo, Rene De Jesus Romero-Troncoso and David Alejandro Elvira-Ortiz **271**

Photovoltaic Water Pumping System for Small Power Conventional AC Pumps. **285**
Bruno Tangerino, Dionízio Roman, Vicente Leite, Alessandro Goedtel, Ângela Ferreira, José Batista and Wellington Maidana

Electric Microgrid in Smart Cities: CEDER-CIEMAT a case study. **295**
Luis Hernández- Callejo, Miguel Latorre and Lilian J. Obregón

Smart Island: Tecnología Power-to-Gas para una isla de Gran Canaria 100% removable. Manuel Bailera, Alejandro García, María Pilar Lisbona and Luis M. Romeo **307**

Comparación tecno-económica de sistemas híbridos FV-CSP en comunidades aisladas con climas cálido y templado. Jesús Armando Aguilar-Jiménez, Nicolás Velázquez, Alexis Acuña, Ricardo Beltrán, Ricardo López-Zavala, Luis Antonio González and Saul Islas-Pereda **323**

Digitalización de medidores de agua analógicos para la modernización a bajo costo del sistema de suministro de agua potable en ciudades. Anthony Vega and Carlos Meza **337**

Dynamic Building Information Modelling with digital cameras. **352**
Francisco Javier Delgado del Hoyo and Javier Finat Codes

Towards the Design and Implementation of a Smart City. Marcelo Herrera, Óscar Acosta, Cesar Diaz, Manuel Dávila, Aura Rodríguez, Javier Ríos and Nancy Edith Ochoa **367**

Thursday: 09/27/2018

Track 3: Mobility and IoT

*Crowdsourcing Optimized Wireless Sensor Network Deployment in Smart Cities: A Keynote. R*afael Asorey-Cacheda, Antonio Javier Garcia-Sanchez, Claudia Liliana Zúñiga-Cañón and Joan Garcia-Haro **381**

Municipal solid waste management in smart cities: facility location of community bins. Diego Gabriel Rossit, Sergio Nesmachnow and Jamal Toutouh **396**

Computational intelligence for detecting pedestrian movement patterns. Juan Chavat and Sergio Nesmachnow **410**

An IoT Group-Based Protocol for Smart City Interconnection. Jaime Lloret, Sandra Sendra, Pedro Luis González and Lorena Parra **425**

Waste Generation Prediction in Smart Cities through Deep Neuroevolution. Andrés Camero, Jamal Toutouh, Javier Ferrer and Enrique Alba **439**

Track 2: Infrastructure, Energy and Environment

Structural Analysis, Modelling and Forecasting of Electricity Prices of the Iberian Electricity Market. Jenice Ramos, Ângela Ferreira and Paula Odete Fernandes **452**

A New Model for Short-Term Load Forecasting in an Industrial Park. Luis Hernández Callejo, Angel García Pedrero and Víctor Alonso Gómez **465**

Services of energy storage technologies in renewable-based power systems. Francisco Díaz-González, Eduard Bullich-Massagué, Cristina Vitale, Marina Gil-Sánchez, Mònica Aragüés-Peñalba and Francesc Girbau-Llistuella **474**

Analysis and characterization of thermographic defects at the PV module level. Sara Gallardo-Saavedra, Luis Hernández-Callejo and Óscar Duque-Pérez **487**

The impact of transmission technologies on the evolution of the electrical grid. Luis Hernández Callejo, Amaia Arrinda, David de la Vega, Igor Fernández and Itziar Angulo **503**

Cloud Computing for Smart Energy Management (CC-SEM project). Emmanuel Luján, Alejandro Otero, Sebastián Valenzuela, Esteban Mocskos, Luiz Angelo Steffenel and Sergio Nesmachnow **513**

Using smart-grids capabilities as a natural hedge against novel risks coming from non-conventional renewable electricity generation. Claudio Risso **529**

Track 1: Energy Efficiency and Sustanaibility

"Ciudadanía consciente": uso de huertos ecológicos como espacios de formación en cuestiones medioambientales y alimentarias. Guadalupe Ramos-Truchero and Marcia Eugenio **544**

Energy Efficiency and temperature reduction through green walls in heat islands - methodological framework - Valle de Aburra urban area case. Ricardo Quijano, Javier Dominguez and Juan Pablo Quijano **553**

A Proposal to Organize the Collaborative Design of Sustainable Inclusive Smart Cities. Jorge Gomez-Sanz and Rubén Fuentes-Fernández **566**

Design of a Microgrid Based on Renewable Energy Sources for an Aquaculture Centre. Marcus Silva, Vicente Leite, Dionizio Roman, Paulo Araujo, Wellington Maidana and Jose Batista **579**

Solar intermittency with Spline fit modeling. Microgrid case CEDER, Soria, Spain. Raúl Lopez Meraz, Luis Hernández Callejo, L.O. Jamed Boza and Víctor Alonso Gómez **592**

Proposals to the Operation, Tertiary Control and Optimization of DC Microgrids. Jorge Mírez, Luis Hernández Callejo, Manfred Horn, Gabriela Mendoza and Lilian J. Obregón **602**

Study of the Influence of DC-DC Optimizers on PV-Energy Generation. Luis Hernández Callejo, Sara Gallardo Saavedra, Alejandro Diez Cercadillo and Víctor Alonso Gómez **616**

Smart Campus Human Tracking: the Case of University of Málaga. Jamal Toutouh, Javier Luque and Enrique Alba **634**

Optimization of the dimensioning process of a very low enthalpy geothermal installation. Cristina Sáez Blázquez, Ignacio Martín Nieto, Arturo Farfán Martín and Diego González-Aguilera **645**

Special Session: Governance and Citizenship

Análisis de la huella de carbono de la ETSIT de la UPM y propuesta de mejora basada en datos de la plataforma IoT Smart CEI Moncloa. Ramón Inarejos, Ana Rodríguez, Gregorio López, Manuel Alvarez-Campana and Carmen Avilés **660**

Libelium technologies and successful use cases in the context of Internet of Things for Smart Cities. Juan Perrela Clavería **675**

Interés de extensión de proyectos "Smart City" a pequeñas ciudades y entornos rurales según el consumo energético. Alberto López Casillas **694**

Soluciones tecnológicas de Vodafone para gestionar ciudades inteligentes. Natalia Lopez and Gonzalo Fernandez **704**

Edificios inteligentes para ciudades inteligentes: el edificio I+D+i del Campus de Soria. Francisco Valbuena, María Jesús González and Cristina Gutiérrez **710**

Perceptions about causes and ways to mitigate Climate change and its relationship with energy consumption in the residential sector. Yoselyn Walsh, Carlos Meza and Alejandra Magana **727**

Programa Micro-Red Inteligente UPB: Un laboratorio vivo de ciudad inteligente. Idi A. Isaac, Gabriel Lopez, Hugo A Cardona and Jorge W. Gonzalez **741**

Hacia una Plataforma de Servicios para Apps Inteligentes en Ciudades Intermedias. J. Andres Diaz-Pace, Luis Berdun, Alejandro Zunino and Silvia Schiaffino **766**

Análisis de la contribución fotovoltaica en un edifico de cero emisiones. Ángel L. Zorita Lamadrid, Oscar Duque-Perez, Daniel Moríñigo Sotelo, Sergio L. González González, Francisco J. Valbuena García, Roque A. Osornio Ríos and Luis Morales Velázquez **781**

COM4RED: Aplicaciones y Servicios de NB-PLC en Nuevas Bandas de Frecuencia Aplicados a la Smart City. Noelia Uribe-Perez, Ibon Arechalde, Amaia Arrinda, David de la Vega, Igor Fernandez, Itziar Angulo and Txetxu Arzuaga **795**

Prototyping a horizontal water wheel for electricity generation in a small museum: the House of Silk. Iago Dalmarco, Paulo Araujo, Vicente Leite, Luís Queijo and Luiz Lima **809**

Analysis of the energy saving potential for heating of double skin glass-glass facades. Víctor Diez Martínez, Roberto Getino de la Mano, José Luis Falagán Cavero and David Borge Diez **815**

Movilidad sostenible: vehículos eléctricos con energía renovable para una ciudad intermedia latinoamericana. Luis Gerardo Gonzalez Morales, Juan Leonardo Espinoza and Juan Marcelo Aviles **830**

La Diputación Provincial de Soria y su compromiso con la energía y el clima. José Antonio Martínez Domínguez **844**

ENERINVEST - La Plataforma para la financiación de proyectos de energía sostenible en España. María Luz Muñoz **856**

UCO Smart Campus, an intelligent environment for the university community. Rafael David Rodriguez Cantalejo, Maria Dolores Radel Macias, Antonio Cubero Atienza and Francisco Vázquez Serrano **872**

Modelo de Open Data GAQO. Grace Andrea Quintana Ortega and Jorge Sneider Quintana Ortega **887**

Designing Innovative Home Energy Systems for Smart Cities: The SilkHouse Project. Marcus Silva, Vicente Leite, Paulo Araujo, Ananda Simoes, Iago Dalmarco, Angela Ferreira and Luis Queijo **898**

Hacia un campus sostenible: El Proyecto RES2+U de la UPM. Gregorio López, Manuel Alvarez-Campana, Manuel Almestar, Carmen Avilés, Domingo Martín, Francesca Olivieri and Gregorio Romero **915**

Integrating non-conventional renewable energy sources (NCRES) in the energy mix in Colombia – Challenges and opportunities. Alejandro Paz Parra **927**

Companies and Other Initiatives

During the day of September 26, and in the afternoon session, the congress has invited experts from the sector of *Smart Cities* to organize a sectoral debate.

This debate will be composed of prestigious companies in the sector, as well as specialized consultants. The aim is to give a business point of view around *Smart Cities*.

Members of the debate:

- Guillermo Renancio Artal, Moderator (EFOR).
- Miguel Maia (Microsoft).
- Miquel Nogué (SII Concatel).
- César Yllera Conde (WELLNESS TELECOM).
- Alfonso Serrano (MS&F Associates)

Plenary Speakers



CEO of IoT Integra

Guillermo Renancio is playing a strategic role at a national level through Efor (IT company of the Integra Group) for the development of the new generation Internet of Things and Unified Communications (Comuniqua) in sectors as relevant as construction or manufacturing industry.

In this sense, Guillermo Renancio has led ambitious projects that combine IoT and Big Data in industrial clients, banking or construction. Guillermo Renancio's work in disseminating the Internet of Things through the application of this technology in energy efficiency projects and intelligent control of assets is allowing him to currently lead energy efficiency-IoT projects in the main industries at a national level.

His experience and knowledge have led him, among other things, to be a speaker at numerous national events, to be an expert in Industry 4.0 and finally a speaker at the IoT World Congress 2017 and 2018. He also led the alliance with Microsoft EMEA in 2017 so that Integra (through its technological brand EFOR) is the first Spanish company selected to develop the IoT market in southern Europe.

As a reference to the professional career of Guillermo Renancio, he is a Telecommunications Engineer from the University of Zaragoza and an Executive MBA from the Instituto de Empresa. Before joining Grupo Integra, he worked in Deloitte and Vodafone. He currently collaborates with IE Business School.

Integra Tecnología is a technology and consulting company with presence in the main Spanish cities linked to innovative technology services (Big Data, IoT, cybersecurity, digital marketing, etc.). Within Integra Tecnología, the companies Efor (technology consultancy), Qualitas (business consultancy) as well as others such as Actio, Formatel and Proquo.

Technical Program

CITIES CIUDADES INTELIGENTES TOTALMENTE INTEGRALES, EFICIENTES Y SOSTENIBLES

CYTED PROGRAMA IBEROAMERICANO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA PARA EL DESARROLLO

Ibero-American Congress of Smart Cities (icsc-cities2018)

Soria, Spain, September 26-27, 2018

	Wednesday - 26/09/2018	Thursday - 27/09/2018
09:00 - 09:30	Registration icsc-cities2018	Track 3: Mobility and IoT
09:30 - 10:00	Opening Session	RITMUS
		102
		58
		38
		84
		49
10:00 - 11:30	Track 1: Energy Efficiency and Sustanaibility	Track 2: Infrastructure, Energy and Environment
	16	95
	42	43
	3	35
	22	37
	53	81
	62	5
	52	68
	15	98
11:30 - 12:00	Coffee break	Coffee break
12:00 - 14:00	Track 3: Mobility and IoT	Track 1: Energy Efficiency and Sustanaibility
	39	11
	47	96
	54	87
	24	72
	29	66
	63	9
	4	44
	59	51
	30	20
14:00 - 15:00	Lunch	Lunch
15:00 - 16:30	Special Session: Governance and Citizenship	Special Session: Governance and Citizenship
	36	83
	48	6
	REDIS - Las Redes de Ciencia, Tecnología e Innovación y su Impacto Nacional e Internacional	8
		12
		61
		67
	Companies and Other Initiatives	77
		25
16:30 - 18:00	Track 2: Infrastructure, Energy and	90
	86	75
	40	80
	2	14
	13	19
	18	50
	82	74
	60	76
	93	33
		73
		65
		56
18:00 - 20:00	Social Progam - Coordination Meeting: CITIES (CYTED)	Coordination Meeting: CITIES (CYTED)
20:00 -21:30	Welcome dinner	Closing Session

Social Program

Wednesday, 26th September

As every year, Soria celebrates during the month of September the "Festival Otoño Musical Soriano". As in other editions, the content of the event will be very attractive for music lovers, being able to enjoy a wide variety of concerts in the Soria's capital. Visitors can enjoy a walk through the city, thanks to the tourist train of Soria.
The train travels the main points of interest of the Soria's culture, being able to visit the main jewels of the classic Romanesque that exist in Spain: http://www.trenturisticosoria.com

Visit the Romanesque art of the city of Soria








Gala Dinner

The gala dinner will take place at Hotel Leonor Mirón. Attendees will have the opportunity to enjoy some of Soria's best gastronomy.

After the Gala Dinner the attendees will be invited to have a drink and share a pleasant moment, enjoying Soria's night atmosphere.

Hotel Leonor Mirón
Paseo el Mirón, 10, 42005 Soria









Coordination Meeting: CITIES (CYTED)

CYTED is the Ibero-American Program of Science and Technology for Development, created by the governments of Ibero-American countries to promote cooperation on issues of science, technology and innovation for the harmonious development of Ibero-America.

CYTED achieves its objectives through different financing instruments that mobilize Ibero-American entrepreneurs, researchers and experts and allow them to be trained and generate joint research, development and innovation projects. Thus, the countries that make up the CYTED Program are able to keep up to date with the most recent advances and scientific-technological developments.

Since its creation in 1984, more than 28,000 Ibero-American businessmen, researchers and experts in priority areas of knowledge have participated in the Program.

The results of the Programme include the generation of strategic R&D projects in which companies and experts participate, who from the CYTED cooperation platform have access to important international funds.

The **Thematic Networks** are **clusters of research and development** (R&D) formed by public or private entities and **corporations** from the member countries of the CYTED Programme, whose scientific or technological activities are related within a common area of interest and included in one of the Programme Areas. Their main objective is the exchange of knowledge between R&D groups and the strengthening of cooperation as a work method.

Dr. Luis Hernández Callejo, Professor/Researcher at the University of Valladolid (UVa), coordinates a CYTED Thematic Network called CITIES (CIUDADES INTELIGENTES TOTALMENTE INTEGRALES, EFICIENTES Y SOSTENIBLES).

The objectives of CITIES are:

- To strengthen the technical and professional training of research centres and participating companies in the cities of the future and, therefore, the improvement of the quality of life and the environment of Latin American citizens.
- Promote new investment opportunities in the sectors covered by CITIES that lead to economic diversification and commercial openness of their companies through the identification of barriers and competitive advantages.
- To promote the environmental and economic benefits produced by the incorporation of CITIES among members of the public administration, group of architects, builders, financing institutions, companies, research centres, society in general, etc., by means of the realization of specific activities directed to these groups in a clear bet for the sustainable development of the cities.

- Search for strengths and weaknesses among the participating entities to consolidate a continuous and active exchange of scientific knowledge that allows the development of an action procedure in the cities of Iberoamerica, as well as the formulation of future R&D projects that will lead to consolidate a future line of work around CITIES.

- To promote the meeting of the different researchers who make up the research groups in the annual conferences/congresses, in order to identify potential implementation projects in the following areas: Intelligent Infrastructure (II), solutions for the monitoring and conservation of cultural and environmental heritage, applications aimed at efficient and sustainable mobility, promotion of renewable generation sources and energy efficiency in the new IC, development of solutions for IC management based on IoT.

- Disseminate the results acquired during the project in the usual frameworks (congresses, seminars, conferences, etc.).

- Carrying out specific courses in the different areas of the project: Climate change and the environment, Integral Urban Development, Taxation and governability.

- Encourage networking, to address issues common to Latin American countries in the scope of the project. In the same way, this network will serve to identify new partners participating in the R&D sector, commercial, productive and institutional. End users (public administrations and companies) will participate.

The two main activities of CITIES in 2018 are the development of the I Ibero-American Congress and the holding of the coordination meeting. This meeting will be held on the 26th and 27th of September, coinciding with the congress event. In the meeting will be reviewed the activities carried out so far, and the 2019 activities will be proposed.

Alocação e Dimensionamento de Painéis Fotovoltaicos Utilizando Otimização por Enxame de Partículas para Reduzir as Perdas Visando os Aspectos Econômicos

Alex Ferreira Moreira[1][0000-0001-5739-0095], Clivaldo Silva de Araújo[2][0000-0002-7693-5836] e Yuri Percy Molina Rodriguez[3][0000-0002-7667-2554]

[1, 2, 3] Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, s/n, Brasil
alex.moreira@cear.ufpb.br[1], clivaldo@cear.ufpb.br[2], molina.rodriguez@cear.ufpb.br[3]

Resumo. Neste trabalho é proposto um método de alocação e dimensionamento de unidades de painéis fotovoltaicos em sistemas de distribuição visando redução de perdas e aspectos econômicos da implementação dos painéis fotovoltaicos. A ferramenta desenvolvida analisa a relação de potência ativa necessária para reduzir das perdas do sistema, os custos de investimento dessas unidades e consequentemente, reduzir os impactos ambientais na geração de energia elétrica. O algoritmo desenvolvido utiliza o algoritmo de Otimização por Enxame de Partículas Modificado. Para validar o método proposto, utilizou-se um sistema IEEE de 13 barras, no qual os resultados mostram que o método proposto tem a capacidade de proporcionar as melhores dimensões de módulos de painéis fotovoltaicos distribuídos nos barramentos das redes. Os resultados obtidos comprovam a melhoria nos perfis de tensão nas barras do sistema, redução das perdas nos alimentadores e redução custos envolvidos na instalação dos painéis fotovoltaicos, consequentemente reduzindo os impactos ambientais causados pela geração das fontes convencionais de energia elétrica.

Palavras chaves: Perdas elétricas, Painéis fotovoltaicos, Otimização por Enxame de Partículas Modificado, Impacto ambiental.

1 Introdução

O crescimento da demanda de energia elétrica nos próximos anos é objeto de estudo de diversos institutos de pesquisa, que estimam um crescimento em torno de 40% da demanda atual do sistema elétrico brasileiro até 2026 [1]. Visando esse crescimento é importante um estudo de novas formas de geração, que possa tanto suprir o crescimento de demanda, assim como reduzir os impactos ambientais causados pelas principais fontes de geração elétrica atual visto que em 2016, o valor médio do fator de CO_2 no Brasil foi de 0,08 t CO_2/MWh de energia produzida[2].

Nesse contexto a fonte solar fotovoltaica pode vir a ser uma solução para esse problema, podendo ser instalados próximos aos consumidores e interligadas diretamente

ao sistema de distribuição. Além disso, por ser classificada dentro do conceito de Geração Distribuída (GD) apresenta um menor custo de geração, confiabilidade, descongestionamento de linha de transmissão, além de ser uma fonte de energia renovável, o que contribui diretamente com a diminuição dos impactos ambientais [3].

Todavia a alocação dessas unidades de PVs em sistemas de distribuição não é uma tarefa tão simples, uma alocação não ótima pode aumentar as perdas na rede e consequentemente piorar os perfis de tensão. Para solucionar esse problema, diversos artigos que empregam métodos de otimização na alocação de GD em sistemas de distribuição vem sendo desenvolvidos [10]. Alguns desses métodos de otimização são baseados nas características e comportamentos biológicos, neurobiológicos, molecular e sistemas de enxames de insetos.

O PSO portanto, apresenta-se como uma ótima ferramenta para otimizar o planejamento da alocação e/ou dimensionamento de PVs em sistemas de distribuição para reduzir as perdas e melhorar os perfis de tensão [4] [11][12]. Entretanto, além da redução das perdas é necessário levar em consideração os custos envolvidos, pois, um dimensionamento ótimo que visa somente a minimização das perdas pode ter um alto custo de investimento, tornando-se impraticável sua implementação. Portanto, é preciso verificar se além da redução das perdas há uma compensação do custo de investimento realizado na instalação das unidades de PVs. Dessa forma, é objetivo desse trabalho um desenvolvimento de um algoritmo para alocar e dimensionar PVs em sistemas de distribuição, de forma a diminuir as perdas do sistema, verificando a influência dessa alocação de forma a minimizar os custos envolvidos: custo de instalação, custos evitados no consumo de energia devido a redução das perdas na rede que a instalação dos painéis proporciona.

Esse artigo está organizado da seguinte forma, na secção 2 é apresentada uma breve introdução bem como a modelagem do algoritmo utilizado; na secção 3 é apresentado o método proposto; na secção 4 é discutidos os resultados obtidos das simulações e na secção 5 as conclusões finais do trabalho.

2 Otimização por Enxame de Partículas

A Otimização por Enxame de Partículas (do inglês *Particle Swarm Optimization* – PSO) é uma técnica de computação evolutiva, baseada em mecanismos biológicos, que visam solucionar problemas de otimização implementados em um computador. Especificamente, o PSO é um algoritmo evolutivo baseado no "comportamento social" de algumas espécies de pássaros. O algoritmo referido foi proposto inicialmente por Kennedy e Eberhart em 1995 [5]. O funcionamento do algoritmo tem início com um conjunto aleatório de possíveis soluções para o problema proposto, melhorando as possíveis soluções de forma iterativa até convergir a um resultado ótimo.

2.1 Modelagem do PSO

O método do PSO pode ser explicado de forma simples através de uma analogia de comportamento dos pássaros em busca de comida. Cada pássaro representa uma par-

tícula se movendo através do espaço de busca, o conjunto desses pássaros é chamado de enxame e cada partícula corresponde a uma possível solução do problema. Periodicamente as posições de todas as partículas são atualizadas e a função objetivo das novas posições é calculada.

O processo de atualização das partículas é feita através de dois passos, dados pelas equações (1) e (2) apresentados em [5].

$$V_i^{t+1} = \omega * V_i^t + \phi_1 * rand_1 * (Pbest_i^t - X_i^t) + \phi_2 * rand_2 * (Gbest_i^t - X_i^t) \quad (1)$$

$$X_i^{t+1} = X_i^t + V_i^{t+1} \quad (2)$$

Cujos parâmetros são descritos na tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros das equações (1) e (2).

Parâmetro	Descrição
ω	Coeficiente de inércia
i	Índice de partícula
t	Índice de tempo discreto
V_i^t	Velocidade da partícula i no tempo t
X_i^t	Posição da partícula i no tempo t
ϕ_1	Parâmetro cognitivo
ϕ_2	Parâmetro social
rand()	Número aleatório no intervalo de (0,1) aplicada à enésima partícula
$Pbest_i$	Melhor posição da partícula i até o momento
Gbest	Melhor posição da população até o momento

O coeficiente de inércia desempenha um papel fundamental no PSO, no qual afeta significativamente a convergência e exploração do algoritmo em busca do ótimo. O peso de inércia determina a taxa de contribuição da velocidade anterior de uma partícula para sua velocidade no momento atual.

Diversos métodos são empregados para calcular o ω, abordados em [6], entretanto o coeficiente de inercia com decremento linear [7] fornece excelentes resultados, aumentando a eficiência do PSO na busca do ótimo. Esse método emprega um coeficiente de inércia variável com o decorrer das iterações a fim de obter um melhor balanço entre a busca global e local. Verifica-se experimentalmente que o peso da inércia variando de 0.9 a 0.4 apresenta excelentes resultados. O coeficiente de inércia é dado pela equação (3) extraído de [7].

$$\omega = \{\omega_{max} - [(\omega_{max} - \omega_{min})/Itt_{max}] * Itt\} \quad (3)$$

Cujos parâmetros são descritos na tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros da equação (3).

Parâmetro	Descrição
$\omega_{máx}$	Coeficiente de inércia máximo a ser adotado
$\omega_{mín}$	Coeficiente de inércia mínimo a ser adotado
$Itt_{máx}$	Número máximo de iterações do algoritmo
Itt	Iteração corrente do algoritmo

É possível observar através da equação (3) que o coeficiente ω muda de valor à medida que o número de iterações (Itt) varia, sendo atualizado a cada iteração. O ω inicia em seu valor máximo e decai ao passo que o número de iterações aumenta, até chegar ao seu valor mínimo. Essa mudança no ω ao decorrer das iterações é útil para que as mudanças de posição das partículas sejam feitas de forma mais exploradoras (passos longos) no início da busca e menos exploradora (passos curtos) no final da busca.

Otimização por Enxame de Partículas Modificado (MPSO). É comum encontrar trabalhos que propõe modificações no PSO original, o que pode vir a influenciar no desempenho do algoritmo, tais modificações podem ser realizadas no cálculo de velocidade bem como na estrutura da topologia de comunicação das partículas e como as partículas do enxame trocam as informações.

Uma dessas técnicas utilizadas consiste em modificar o PSO para trabalhar com partículas que venham a ter seus valores inteiros e pré-definidos já que a otimização por enxame de partículas não permite trabalhar com variáveis discretas [4]. Essa modificação é necessária quando se trabalha com painéis fotovoltaicos (PVs) devido à disponibilidade das potências elétricas disponíveis no mercado possuírem valores inteiros.

O MPSO segue o mesmo princípio do PSO original, porém, com a modificação as movimentações das partículas são feitas em passos com valores inteiros, referentes a uma faixa de variáveis pré-estabelecida, com isso as partículas só se locomovem nessa faixa. Os cálculos de velocidades e da posição das partículas são realizados aplicando-se as equações (1) e (2), entretanto quando a nova posição da partícula é atualizada o algoritmo realiza uma tomada de decisão, caso o valor da posição seja diferente dos preestabelecidos, o algoritmo adotará o valor da faixa mais próximo.

3 Método Proposto

Na implementação do método proposto é necessário utilizar o *software DIgSILENT PowerFactory*®, ferramenta necessária para simular o sistema teste adotado, para isso é preciso inserir os componentes das redes e suas respectivas características elétricas no *software*. Os painéis fotovoltaicos são inseridos em todos os barramentos da rede com potência inicial de geração de 0W. O responsável por alocar e dimensionar as potências dos PVs é o algoritmo MPSO proposto, programado utilizando a ferramenta

DPL – do inglês *DIgSILENT Programming Language* – disponível no próprio *PowerFactory®*.

Na elaboração da ferramenta proposta fez-se necessário introduzir algumas premissas como:

- Limites de tensão nos barramentos estabelecidos entre 0,95 e 1,05 p.u;
- Fatores de penalidades da função objetivo fixos;
- Potência dos painéis são fixos, baseados em valores comerciais e preestabelecidos em 0 kW, 200 kW, 400 kW, 600 kW, 800 kW, 1000 kW, 1200 kW.
- O número de partículas adotado é de 50. Tal escolha foi adotada baseada devido ao tamanho da dimensão do sistema.

O número de partículas contribui para uma maior exploração do espaço de busca, entretanto o seu aumento excessivo pode acarretar numa queda de desempenho do algoritmo no que diz respeito ao tempo de convergência, pois aumenta o número de operações matemáticas, dessa forma é preciso ter um devido cuidado na escolha do número de partículas adotado. Para realizar os cálculos da função objetivo é necessário calcular o fluxo de carga, a partir disso obtêm-se as perdas, perfis de tensão nos barramentos e carregamento das linhas, essas informações são fundamentais no cálculo da função objetivo. O cálculo do fluxo de carga é realizado pela função *LoadFlow* disponível no próprio *PowerFactory®*.

A Função Objetivo (FO) a ser minimizada é composta das perdas técnicas do sistema (kW) e dos custos de investimento na instalação dos painéis (R$), apresentada na equação (4). Trata-se portanto de uma função multiobjectivo, pois existe dois objetivos incomparáveis e conflitantes a serem minimizados, desse modo, minimizar os custos implica no aumento das perdas da rede, da mesma forma, a minimização das perdas implica no aumento dos custos envolvido na instalação dos PVs.

$$FO = P_N + Custo \tag{4}$$

O custo é composto do custo de investimento que depende da potência instalada, subtraído da economia mensal em reais na redução das perdas que se teria com a alocação de PVs como se pode ver na equação (5).

$$FO = P_N + (C_i - economia) \tag{5}$$

A economia é composta pela perda anterior à inserção dos painéis, subtraída da perda nova multiplicada pelo custo do consumo, como se pode ver na Equação (6).

$$FO = P_N + [C_i - (P_A - P_N) * (R\$/kWh)] \tag{6}$$

Colocando as perdas novas em evidência e considerando $- P_A * kWh$ como uma constante na equação (6) obtêm-se a equação (7).

$$FO = P_N * [1+ (R\$/kWh)] + C_i + C \tag{7}$$

Dois critérios de penalidades foram acrescentados à equação (7), elas são necessárias para que o dimensionamento dos PVs nos barramentos possam manter os níveis

de tensão entre 0.95 e 1.05 p.u. Caso estiver fora desse critério, às diferenças de tensões em relação à tensão nominal da rede são somadas e multiplicadas por um fator de penalidade (FP_{ten} = 100000), de acordo com a equação (8).

$$\Delta V = FP_{ten} * (\sum \Delta V) \quad (8)$$

O mesmo acontece se o carregamento de alguma das linhas ultrapassasse 100%. A linha que ultrapassar o carregamento limite de 100% é diminuída pelo valor 100 e multiplicado por um fator de penalidade (FP_{desv} = 1000), dos valores máximos, dado pela equação (9).

$$\Delta L = FP_{ten} * (\sum \Delta L) \quad (9)$$

É importante destacar o papel da penalidade, ela faz com que o algoritmo "fuja" dos valores dimensionados nas partículas que levaram o sistema a infringir as premissas adotadas. As penalidades são representadas por ΔV para os desvios tensão e ΔL para os desvios de carregamento da linha. Os valores adotados para os fatores de penalidades se justificam pelo fato que o ΔV e o ΔL na equação (10) precisam ter valores altos, para então penalizar a função objetivo.

Desconsiderando C na equação (7) devido ao fato de estar presente em todas partículas, portanto sua eliminação na FO não sofrerá nenhuma mudança significativa. Dessa forma a FO fica como se pode ver na equação (10).

$$FO = P_N * [1+ (R\$/kWh)] + C_i + \Delta V + \Delta L \quad (10)$$

Na realização dos cálculos pertinentes a função objetivo pôde-se verificar que as componentes perdas e custos da função objetivo tinham valores desproporcionais, o que seria um problema para o algoritmo desenvolvido já que os componentes teriam diferentes proporções. Portanto, se fez necessário a multiplicação de constantes de forma a tornar os pesos das componentes da FO equivalentes, como mostra a equação (11).

$$FO = 2 * P_N * [1+ (R\$/kWh)] + 0{,}126 * C_i + \Delta V + \Delta L \quad (11)$$

De acordo com [8], o custo para a inserção de PVs em dólar é de 2.03 USD/W, considerando o dólar a R$ 3.10 (Reais) têm-se que o custo de inserção é 6.3 R$/W. Essa informação é relevante no custo de investimento da FO da equação (11). O valor do kWh adotado foi o de fora de ponta cobrada pela concessionária local no estado da Paraíba que custa R$ 0.16154 sabendo-se que os painéis fotovoltaicos funcionam apenas durante o período diurno.

Por meio de vários testes , os valores adotados de, ϕ_1 e ϕ_2, para realizar os cálculos da equação (3) foram respectivamente 1.7 e 1.7. Com relação ao ω adotou-se os valores proposto por [7] em que foram adotados 0.9, 0.3 e 100 para $\omega_{máx}$, ω_{min} e $Itt_{máx}$, respectivamente. As variáveis utilizadas na metodologia proposta estão listadas na tabela 3.

Uma curva de Pareto ótimo foi proposta para uma melhor análise do custo-benefício, relacionando as perdas e custos envolvidos. Para isso foi necessário uma pequena alteração na equação (11), como se pode observar na equação (12).

$$FO = \alpha * [2 * P_N * [1+ (R\$/kWh)]] + (1- \alpha) * (0{,}126 * C_i)+ \Delta V + \Delta L \qquad (12)$$

Tabela 3. Descrição das variáveis.

Parâmetro	Descrição
FO	Função Objetivo
P_N	Perdas com a inserção de painéis fotovoltaicos
Custo	Custos
C_i	Custo de investimento na instalação dos PVs
economia	Economia em R$
P_A	Perdas sem a inserção de painéis fotovoltaicos
(R$/kWh)	Custo unitário do consumo da energia elétrica em kWh
C	Constante
FP_{ten}	Fator de penalidade da tensão
FP_{desv}	Fator de penalidade do carregamento de linha
$\sum\Delta V$	Somatório dos desvios de tensão nos barramentos
$\sum\Delta L$	Somatório dos desvios de carregamento das linhas
ΔV	Desvios de tensão penalizado
ΔL	Desvios de carregamento penalizado

Como se pode visualizar na equação (12) foi acrescentado um α que multiplica os componentes das perdas e dos custos. Dessa forma, variando-se o α de 0.05,0.1,0.15…0.90,0.95 têm-se uma análise das perdas pelo custo, visto que quanto menor for o α dar-se uma maior prioridade aos custos, quanto maior o α a prioridade do algoritmo passa a ser as perdas. Para o dimensionamento dos painéis nos barramentos dos sistemas utilizados nesse trabalho utilizou-se o $\alpha = 0.5$, entretanto com a variação do α é possível escolher um ponto ótimo da relação perdas x custos que melhor se adeque ao problema do consumidor que deseje instalar painéis em sua rede.

4 Resultados

Nessa secção são apresentados e analisados os resultados das simulações realizadas nos sistemas de distribuição radial IEEE 13 barras, com esse sistema verifica-se a funcionalidade do algoritmo proposto nesse trabalho, aplicando a metodologia empregada na secção 3.

4.1 Sistema IEEE 13 Barras

Este sistema radial possui 13 barras, com tensão nominal de 12,66 kV, carga total ativa de 10,54 MW e reativa de 5,99 MVar. O sistema composto por 12 linhas tem

seus dados (resistência e reatância) fornecidos em [4]. A capacidade de corrente das linhas desse sistema é dimensionada de forma que se tenha 80% de carregamento, simulando uma situação próxima da realidade das concessionárias de energia. Nesse sistema, a rede externa é uma barra infinita, ou seja, um barramento que fornece a potência solicitada do sistema. A rede externa está conectada na primeira barra, que se considera como *slack* (Barra de referência), as demais barras são do tipo PQ. Nesse sistema todas as barras possuem cargas, exceto a barra 1. Na figura 1 é apresentado o sistema IEEE-13.

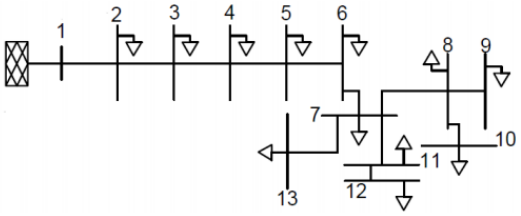


Fig. 1. Sistema IEEE 13 Barras [4].

4.2 O algoritmo desenvolvido

O algoritmo desenvolvido foi projetado com o intuito de ser versátil, e que seja aplicado a qualquer sistema de potência. Para que haja um melhor entendimento do funcionamento do algoritmo desenvolvido ilustra-se na figura 2 o diagrama de funções de como o algoritmo desenvolvido em DPL é organizado.

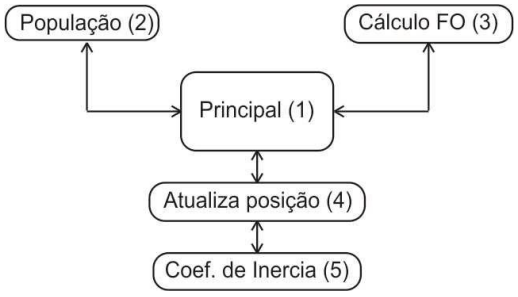


Fig. 2. Diagrama de classes do algoritmo desenvolvido no DPL.

Na figura 2 os blocos: População, Cálculo FO, Coef. Inércia e Atualiza Posição são sub-*script*s (funções) desenvolvidas para melhor organizar o algoritmo desenvolvido. A numeração ao lado indica a ordem de execução de cada função. Cada bloco desta figura é melhor explicado a seguir:

- População: esse sub-script é responsável por verificar o número de barras, o número de linhas e o número de geradores existentes no sistema. Além disso, a função População executa o fluxo de carga, obtendo assim as tensões nos barramentos, o carregamento das linhas e as perdas do sistema antes da inserção dos painéis, tais

dados são salvos em arquivo no formato ".txt". Esses dados são importantes para efeito comparativo. O passo seguinte que o sub-*script* realiza é gerar uma população aleatória com os valores preestabelecidos dos painéis fotovoltaicos.

- Cálculo FO: esse sub-*script* é responsável por calcular a função objetivo e por verificar o Pbest de cada partícula e Gbest de toda a população.
- Atualiza Posição: esse sub-script é responsável por atualizar as posições e velocidade das partículas de acordo com as equações (1) e (2). Além disso esse sub-*script* é responsável por chamar a execução do Calcula Coef. Inércia.
- Coef. Inércia: esse sub-*script* é responsável por calcular os coeficientes de inércia que são aplicados na equação (1). O cálculo do coeficiente de inércia é feito através da equação (3).
- Principal: esse *script* é responsável por gerenciar todos os demais sub-*scripts*. Nele é atribuído os valores sorteados em População aos PVs do sistema. Depois é calculado o fluxo de carga com GD, os valores obtidos após o cálculo são salvos no formato ".txt". Posteriormente chama-se o sub-*script* Calculo FO em que os valores calculados após o fluxo de carga são utilizados para calcular a FO. Depois, atualiza-se as posições e velocidades, para isso chama-se a função Atualiza Posição. Esse processo se repete até que o número de iterações seja menor do que 100 ou que a diferença entre a FO da melhor e pior partícula da população seja menor do que 1% através do erro calculado na equação (13). Isso implica que o algoritmo convergirá quando todas as partículas estiverem aproximadamente com o mesmo dimensionamento. É importante destacar que o número de iterações equivale ao número de populações necessárias para que o algoritmo convirja.

$$Erro = (F_{worse} - F_{best})/ F_{best} \quad (13)$$

Em que:
F_{best}: É a melhor partícula da população.
F_{worse}: É a pior partícula da população.

As potências dimensionadas pelo algoritmo é a potência máxima que os painéis podem fornecer nas condições ideais de irradiação. Entretanto na prática não é o que o acontece, a irradiação incidente nos painéis varia no decorrer do dia sendo preciso fazer uma equivalência – dada em horas de sol pico (HSP) – do quanto tempo esses painéis trabalhou em suas condições ideais no dia. Considerando as perdas do sistema fotovoltaico nulas, e o HSP de João Pessoa igual a 5.53 horas [9] podemos calcular a quantidade aproximada de energia gerada por esses painéis pela equação (14).

$$E_{Gerada} = Pot * HSP \quad (14)$$

Em que:
E_{Gerada}: É a energia efetivamente gerada pelos painéis fotovoltaicos no dia.
Pot: Potência máxima dos painéis.
HSP: Horas de Sol Pico.

4.3 Análise dos resultados do sistema IEEE 13 barras

Os resultados desse sistema obtidos via simulação são calculados para 50 partículas e cada uma possui 12 painéis fotovoltaicos, que representam a micro geração injetados em cada uma das 12 barras do sistema simulado. No início do algoritmo os painéis fotovoltaicos são gerados aleatoriamente na primeira população e a medida que as posições das partículas são atualizadas com o decorrer das iterações os valores gerados aleatoriamente tentem a convergir para um ótimo comum. A figura 3 ilustra uma amostra dos valores de potências dos painéis na trigésima quinta iteração.

Partícula	Barramento											
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW	800 kW	600 kW	0 kW	1200 kW	0 kW
2	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW	200 kW	800 kW	0 kW	0 kW	1200 kW	0 kW
	·					·					·	
	·					·					·	
	·					·					·	
24	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW	600 kW	800 kW	0 kW	1200 kW	0 kW
27	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW	600 kW	600 kW	200 kW	1200 kW	200 kW
	·					·					·	
	·					·					·	
	·					·					·	
48	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW	400 kW	800 kW	800 kW	0 kW	1200 kW	0 kW
50	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW	400 kW	800 kW	600 kW	0 kW	1200 kW	0 kW

Fig. 3. Painéis fotovoltaicos e suas respectivas potências na trigésima quinta população.

É possível observar na figura 3que alguns barramentos já estão com suas potências definidas, tais como as barras 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 12. Alguns outros barramentos, tais como o 8, 9 10, 11 e 13 ainda não convergiram, pois ainda há divergência nos valores dimensionados pelas partículas nesses barramentos. Entretanto com o decorrer do tempo, com o aumento das iterações os barramentos que possuem valores divergentes tenderão a convergir um mesmo valor de dimensionamento em comum. A tabela 4 ilustra o dimensionamento ótimo encontrado pelo algoritmo.

Tabela 4. Dimensionamento ótimo dos painéis barramentos do sistema IEEE 13 barras.

Barramento	Dimensionamento (kW)
1	---
2	0
3	0
4	0
5	0
6	0
7	0
8	200
9	800
10	600
11	0
12	1200
13	0
Total	**2800**

Após o algoritmo ter convergido e todas as partículas estão dimensionadas em um ponto ótimo, de acordo com a proposta do presente trabalho, que visa uma redução de perdas, custos na instalação de painéis fotovoltaicos e consequentemente reduzir os impactos ambientais na geração de energia elétrica. Observa-se que as alocações de PVs foram feitas apenas nos barramentos 8, 9, 10 e 12, dessa forma a alocação foi feita pelo algoritmo nos barramentos extremos do sistema IEEE, ou seja a injeção de potência ativa nessas barras tem maior impacto na redução das perdas do que fossem injetadas nos barramentos próxima a barra infinita. A potência total otimizada foi de 2800 kW o que de acordo com [8] terá um custo de R$ 17.640.000,00.

Aplicando a equação (14) é possível obter que a média diária de geração de energia elétrica dimensionada pela ferramenta computacional desenvolvida é de 15.484 kWh/dia. Mensalmente se produz 464.520 kWh, com essa energia gerada consegue-se reduzir cerca de 37 t CO_2/mês, contribuindo diretamente para a redução dos impactos ambientais, visto que a fonte solar fotovoltaica é uma fonte de energia renovável e inesgotável.

O algoritmo desenvolvido pôde encontrar a solução ótima antes de 100 iterações, ou seja o algoritmo converge quando a equação (13) é menor que 1%. Entretanto, como forma de observar o comportamento do MPSO programou-se o algoritmo para que realizasse uma nova busca pelo ótimo sem o critério de parada que utiliza a equação (13), executando a busca pelo ótimo até atingir 200 iterações. A figura 4 ilustra dessa forma o comportamento do MPSO, apresentando as variações da FO da pior partícula do enxame a cada iteração.

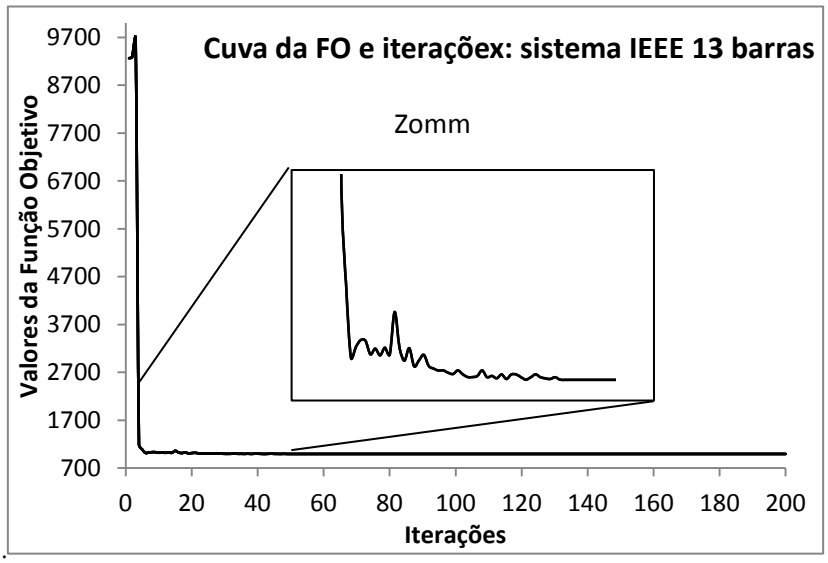


Fig. 4. Função objetivo vs Iterações

Essa análise é importante para observar que o algoritmo após encontrar a solução ótima não varia sua função objetivo, isso significa que não há mais algum outro ponto no espaço de busca que irá fornecer uma melhor solução. Enquanto todas as partículas

não converge para o mesmo ponto ótimo os valores das FO variam a cada iteração, o que justifica as oscilações vistas na figura 4.

Na figura 5 é ilustrado o gráfico das tensões em cada barra, com e sem painéis fotovoltaicos (PVs).

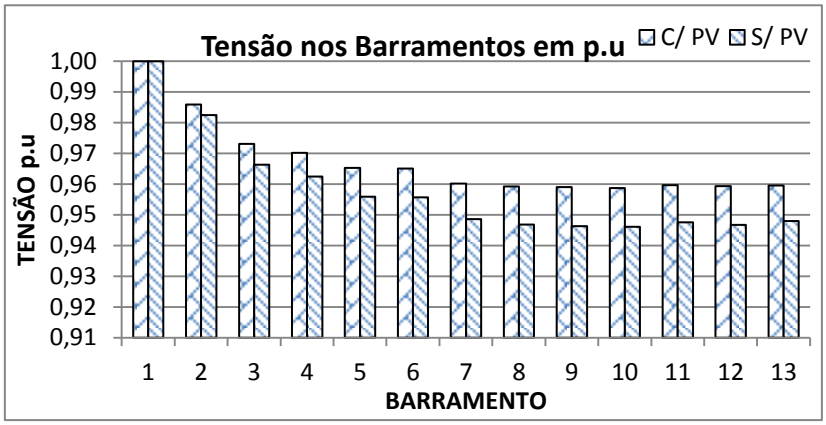


Fig. 5. Níveis de tensões do sistema com e sem PV.

As barras mais próximas da fonte externa estão com melhores níveis de tensão entre 1.0 p.u. e 0.95 p.u. (barras de 1 a 6), já as mais distantes da barra de geração (barras de 7 a 13) estão com perfil de tensão abaixo de 0.95 p.u. É possível notar que todos os barramentos melhoraram o perfil de tensão com a inserção de PV. No programa MPSO foram estabelecidos limites operacionais da rede entre 1.05 p.u.e 0.95 p.u. As barras do sistema com painéis fotovoltaicos ficaram com os níveis de tensão entre 0,958 p.u e 1.0 p.u, atendendo as exigências pré-estabelecidas.

Com a inserção dos painéis reduz-se as perdas nos alimentadores do sistema, como mostra a tabela 5.

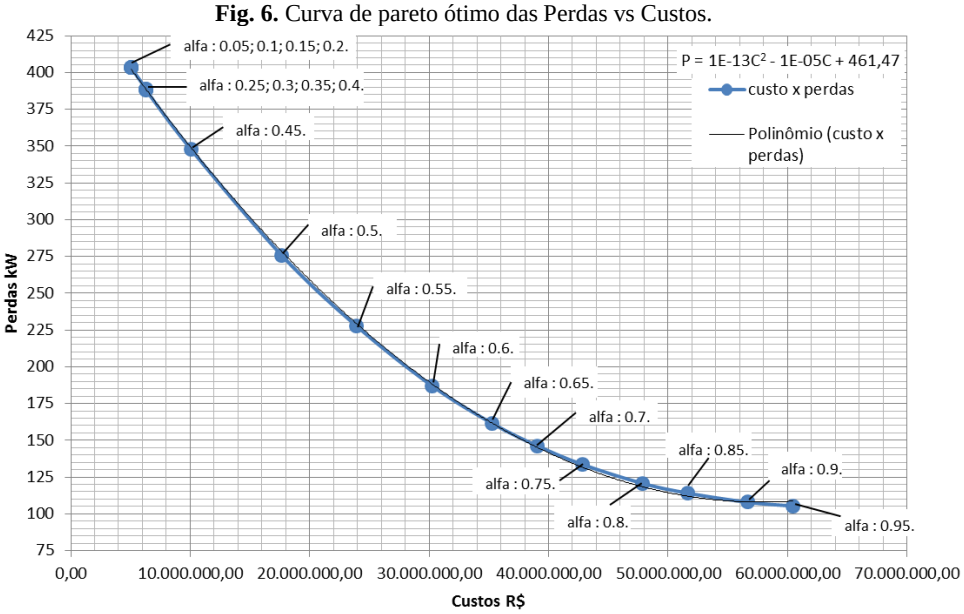
Tabela 5. Perdas nos trechos com e sem PV.

Linhas		Perdas sem	Perdas com PV	Redução por linha
De	Para	PV (kW)	(kW)	em kW
1	2	177.27	112.81	64.46 (36.36%)
2	3	149.88	88.59	61.29 (40.89%)
3	4	33.22	19.47	13.75 (41.49%)
4	5	49.93	26.76	23.17 (46.40%)
5	6	0.10	0.10	0.00 (0.00%)
5	7	47.51	22.56	24.95 (52. 52%)
7	8	3.62	1.08	2.54 (70.17%)
7	11	1.96	0.50	1.46 (74.79%)
7	13	0.64	0.63	0.01 (1.56%)
8	9	0.43	0.13	0.30 (69.77%)
8	10	0.43	0.15	0.28 (65.12%)
11	12	0.94	0.15	0.79 (84.04%)
Total		**465.93**	**272.93**	**193 (41.42%)**

Observa-se que com a inserção dos PVs as perdas caíram de 465,96 kW (sem PV), para 272,93 kW (com PV), dessa forma, foram reduzidos 193 kW de perdas nos alimentadores do sistema, o que acarreta numa redução de custos para o consumidor responsável pela rede, caso o algoritmo seja aplicado em um sistema real.

A curva de Pareto ótimo pode ser vista na figura 6. Percebe-se que para pequenos valores de α as mudanças nas perdas não são tão significativas, porém quando o $\alpha \geq 0.45$ as mudanças nas perdas passam a ser significativas, logo, quando se prioriza as perdas aumenta-se os custos de instalação, visto que terá que instalar mais módulos de painéis para garantir uma perda baixa do sistema.

Fig. 6. Curva de pareto ótimo das Perdas vs Custos.



Com base nos resultados observa-se que o algoritmo proposto pode fornecer bons resultados no dimensionamento para unidades de painéis fotovoltaicos, reduzindo as perdas do sistema em 41,42 % e reduzindo os custos de instalação. A curva de pareto ótimo proporciona uma análise custo-benefício das perdas pelo custo, possibilitando uma análise mais crítica acerca dos investimentos a serem feitos na instalação dos painéis, podendo-se priorizar a redução dos custos ou redução das perdas na rede. Além disso, os resultados ilustram a eficácia desta abordagem para melhoria no perfil de tensão. Uma linha de tendência foi calculada na curva de pareto com a variação do alfa, cuja fórmula é dada pela equação (15).

$$P = 10^{-13} C^2 - 10^{-5} C + 461{,}47 \quad (15)$$

Em que P representa as perdas em kW e C os custos em reais (R$). Dessa forma as perdas desse sistema pode ser calculada através da equação (15) de acordo com o investimento disponível a ser aplicado no sistema elétrico estudado.

5 Conclusão

Neste trabalho foi proposto um método baseado no algoritmo PSO, que dimensiona as unidades de geração distribuída (painéis fotovoltaicos) com valores comerciais, tendo como finalidade a redução de perdas, o menor custo envolvido na instalação e consequentemente a melhoria do perfil de tensão na rede.

Dos resultados obtidos com o sistema teste de 13 Barras, observou-se que com a geração distribuída as perdas totais diminuíram em aproximadamente 41.42% e os níveis de tensão ficaram entre os limites permitidos, como se pode observar na figura 5 o menor nível de tensão após a alocação foi de aproximadamente 0,96 p.u. O custo investido otimizado pôde ser reduzido evitando assim custos adicionais a quem deseja instalar os PVs. Além disso, com o dimensionamento encontrado pelo algoritmo conseguiu-se reduzir cerca de 37 t CO_2/mês, motivando o uso de mais tecnologias de geração que utilizem fontes renováveis de energia elétrica.

O trabalho apresentado, com a aplicação do algoritmo MPSO, obteve resultados satisfatórios referentes ao dimensionamento nos sistemas propostos. Comprova-se a eficiência dos métodos proposto, desenvolvido como uma ferramenta de análise adequada e de alto nível, com o objetivo de otimizar o uso de painéis fotovoltaicos em micro redes contribuindo para uma maior eficiência energética dos sistemas e redução direta nos impactos ambientais na redução de CO_2.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Rede Temática CYTED "CIDADES INTEGRADAS, EFICIENTES E SUSTENTÁVEIS (CIDADES)" nº 518RT0558. Finalmente à CAPES, que proporcionou o suporte financeiro para a realização desse artigo.

Referencias

1. EPE, 2017. Nota Técnica DEA 001/17. Projeção da demanda de energia elétrica para os próximos 10 anos (2017-2026). Disponível em: <https://goo.gl/9pBXGW>. Acesso em: 11 nov. 2017.
2. SENAI. Departamento Regional do Estado do Rio de Janeiro Cartilha inventário de emissões de gases de efeito estufa / [SENAI. Departamento Regional do Estado do Rio de Janeiro] . – Rio de Janeiro : [s.n], 2017.
3. INEE. O que é Geração Distribuída. Instituto Nacional de Eficiência Energética, 2011. Disponível em: <http://www.inee.org.br/forum_ger_distrib.asp>. Acesso em: 11 nov. 2017.
4. J. S. de Souza, "Dimensionamento ótimo de painéis fotovoltaicos usando enxame de partículas modificado para reduzir as perdas de energia e melhorar o perfil de tensão", Dissertação (Mestrado), UFPB, João Pessoa, PB, Brasil, 2016.
5. KENNEDY, J.; EBERHART, R. C., 1995. Particle swarm optimization. In Proceedings of the 1995 IEEE International Conference on Neural Networks, volume 4, pp. 1942–1948, Perth, Australia, IEEE Service Center, Piscataway, NJ.

6. Bansal, J. P.; singh, P. K.; Saraswat M.; Verma A., Jadon S. S.; Abraham A., "Inertia weight strategies in particle swarm optimization", Proceedings Third World Congress on Natureand Biologically Inspired Computing, pp. 633-640, 2011.
7. Xin, J.; Chen, G.; Hai, Y., "A Particle Swarm Optimizer with Multistage Linearly-Decreasing Inertia Weight", In Computational Sciences and Optimization, 2009. CSO 2009. International Joint Conference on, volume 1, pages 505–508. IEEE, 2009.
8. IEA-PVPS. Trends in Photovoltaic Applications: Survey report of selected IEA countries between 1992 and 2015. Report IEA-PVPS T1-30: 2016. Disponível em: <www.iea-pvps.org>. Acesso em: 29/11/2017.
9. Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sergio de S.Brito. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata&> Acesso em 28 de junho de 2018.
10. P. Prakash, D. K. Khatod, Optimal sizing and siting techniques for distributed generation in distribution systems: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews 57 (2016) 111 - 130. doi:https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.099.
11. M. H. Albadi, H. M. Soliman, E. F. El-Saadany, M. A. Thani, A. Al-Alawi, S. Al-Ismaili, A. Al-Nabhani, H. Baalawi, Optimal allocation of PV systems in distribution networks using PSO, in: 2017 7th International Conference on Modeling, Simulation, and Applied Optimization(ICMSAO), 2017, pp. 1 - 5. doi:10.1109/ICMSAO.2017.7934886.
12. A. Jayavarma, T. Joseph, Optimal placement of solar PV in distribution system using particle swarm optimization, International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering (2013) 329 - 337.

A Big-data solution to combine climatic, atmospheric and soil-water dynamics data and improve green urban planning

Adrián Pascual[1[0000-0002-2957-7810]], Rafael Rivera[2], Rodrigo Gómez[3], Domínguez-Lerena[4]

[1] School of Forest Sciences, University of Eastern Finland, PO Box 111, 80101 Joensuu (FI)
[2] ICLAVES, S.L. Madrid (SP)
[3] CESEFOR, Pol. Ind. Las Casas, Calle C, Parcela 4, 42005 Soria, (SP).
[4] SDL, Investigación y Divulgación del Medio Ambiente, S.L. Madrid (SP)

Abstract. Approximately 75% of Europe's population lives in urban areas and by 2020 the value will reach the 80%. Increasing the access to green urban areas is a high priority in the agenda of densely populated areas. To accomplish, new urban forest areas have to be created, and so infrastructures, within the urban environment. Green urban planning will benefit of decision-support tools that help to monitor and evaluate the state of new urban forests. The spatial component in green urban planning matters when it comes to allocate resources efficiently. One approach is to use spatially-distributed wireless sensors to collect real-time data on urban forests. The influence of atmospheric and meteorological conditions impacts soil-water dynamics, the key component to ensure the survival of trees. We propose a novel methodology, a big data design, that combine real-time information from soil sensors and climate data. The design was applied to monitor the establishment of a new urban forest. The accuracy and precision of sensor records was applied to evaluate a set of treatment alternatives than can help trees to better resist drought and stress episodes in arid environments. The results showed the potential of this methodology to assess watering needs and adjust resources to tree response in this case. The presented methodology helps decision makers to detect spatial differences and to ease the access to real-time information on the status of urban forests.

Keywords: Sensors, Big data, Data capturing, Monitoring

1 Introduction

Increasing urban green area is a valuable policy and strategy to face climate change consequences [1] and mitigate its effects on human beings [2]. Especially in densely and increasingly populated urban areas, these effects are a matter of concern due to restrict access to green areas [3]. In this regard, Southern Europe appears as a sensitive area to climate change due to the limited water availability [4]. The fast development of urban areas during last decades was focused on giving solutions to basic ur-

ban needs: housing and infrastructure. Habiting requirements but also agricultural and industrial activities reduce the availability of optimal land potentially devoted to create green areas. In addition, the expansion of the Wildland-Urban Interface (WUI) increased the complexity of planning as urban zones, agriculture and forestry compete/share the space [5].

The natural recover of vegetation in the urban and peri-urban environment is a very slow process [6] and, in many cases, human intervention is required to overpass both natural and human-related barriers (e.g., soil degradation). In this regard, urban and peri-urban forests are regarded as feasible solutions for re-greening cities worldwide [7-8]. Those projects should address cost-effective measures in order to optimize inputs and decrease operational costs (e.g., watering infrastructure, nursery). Increasing forest cover and green areas within degraded and polluted urban environments seems not entirely possible in the short-term, but nature-based solutions [9] can create more environmentally favorable conditions in a relatively short period at a reasonable cost. In this regard, the improvement of soil conditions is a key step for implementing of urban green spaces programmes in Mediterranean semiarid areas [10]. Under these circumstances, green urban planning requires of decision-support tools that can help managers to better understand the current status of urban forests and most important, optimize resource allocation. Monitoring systems can be regarded as monitoring systems where to capture the spatial variation of biophysical properties of interest.

In soil-water dynamics, the presence of micro-site differences leads to important variability in edaphic properties [11]. Therefore, there is a need to capture geospatial information for a better assessment of soil-water dynamics [12] considering also the implications in terms of land management [13]. The multiple benefits of urban forests can be all accomplished only when species selection acknowledge local climatic conditions [14]. Trees initial response in a plantation is affected, in order of importance, by environmental conditions, the management of the plant morphology and its physiology [15]. For example, increasing soil moisture and rainfall retention boost initial rooting and this result in longer vegetative periods [16].

Disciplines such as agronomy or geology have already integrated sensoring geospatial solutions into experimental designs [17]. Unfortunately, their application to address green urban planning challenges remains somehow unexplored although recent experiences have paved the way in urban forestry [18]. The increasing peri-urban area and the dispersed green areas allocation require the use of supporting remote-based methodologies capable to combine multiple data sources with the aim of inform land managers in real-time about vegetation stress, watering needs and soil-dynamics behavior. In this scenario, we propose a novel methodology to measure the efficiency of restoration techniques to increase soil moisture content.

In this study, we evaluated how efficient alternative restoration techniques are at improving the survival rate of five tree species in severe initial conditions: i) plantation on an abandoned area within an urban environment, ii) lack of watering infrastructure and iii) in a region where episodes of severe drought and cold are usual. With the aim of maximizing the sensoring system, we compared the influence of seasonal variation of rainfall runoff, water infiltration and microclimate conditions with the aim of measuring the impact of biophysical factors on the establishment of an urban forest. The presented methodology can help decision makers in green urban planning to monitor soil-water dynamics in the study area and, for instance, optimize water resources. The presented wireless soil & climate sensoring system is a potentially valuable method to be implemented in existing urban forest projects, complementing e.g., existing EU-funded programmes and networks, that are putting great efforts on recover vegetation within the urban environment.

2 The urban forest experiment

Our study site is located within the peri-urban area of Valladolid connected to the city by walk paths close to the Pisuerga River. The development of Valladolid (Castilla y León, Spain) during last decades perfectly reflects the trend many other cities have experienced in Europe: it has doubled its population since 1960 (INE, 2016). This is explained by the boost of industrial activities, mainly due to the automotive industry, and also construction to provide housing to an increasing migration flow from nearby settlements to town. Consequently, the traditional agricultural landscape of peri-urban areas shifted into a mosaic of urban land uses in which environmental conditions can be highly improved. The experiment area is a 13-ha urban area that is on the edge of a riparian zone while limiting to an abandoned industrial facility. On the other side of the river, there is a one of the largest factories in the city and the region (Michelin, Fig.1). The area has been abandoned for more than a decade and, as a result, there was a large amount of irregularly distributed coarse elements throughout the study site. Communication facilities and infrastructure satisfied the minimum requirements to establishment the experiment. both for reaching the pot and for telecommunication purposes. For instance, the air quality measuring station from the Council is connected to the internal wireless network (fiber optic) located nearby the study site.

The climate in the area is continental Mediterranean, with substantially variation of temperatures between along the days. Winters are cold (average monthly temperatures under 5°C) with frequent fogs and frosts (61 frost days on average) and 8 days of snow per year while summers are hot and dry, with maximums above 30°C and daily minimal values slightly exceeding 13°C. The average annual rainfall is 422 mm, uniformly distributed along the year with the exception of July and August. Soil composition was analysed by two trenches to collect samples at three different depths (lower limits 20, 50 and 120 cm respectively).

The spatial arrangement of the experimental design consisted on four randomly distributed control plots. A control plot was defined as a sum of four blocks. On each block, four alternative planting techniques were tested: i) plants in container (*NoTreat*), plants with mycorrhizas inoculated during planting (*Mycorrhiza*), plants in container adding hydrogel during the planting (*Retainer*) and individuals were planted both inoculating the plans and adding hydrogel in the planting holes (Mixed). The blocks consisted on 90 observations (i.e., planted trees).

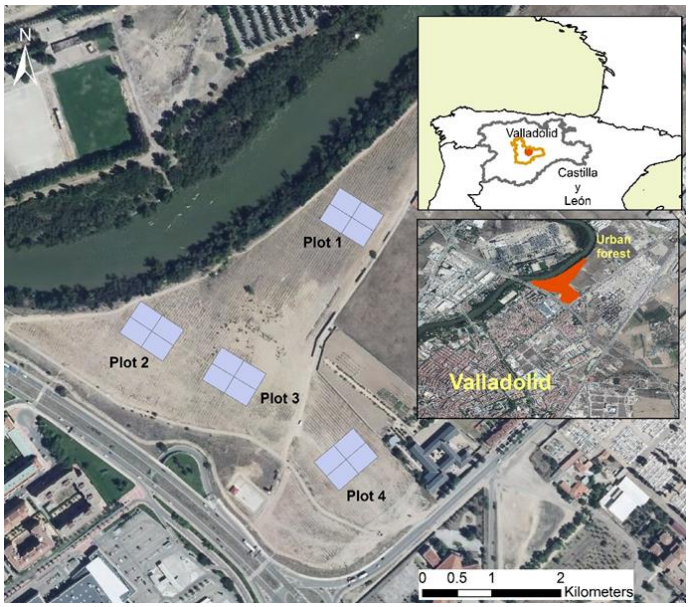


Fig. 1. Location of the experiment

3 Materials

3.1 Soil sensors

A network of soil sensors was installed in each of the four control plots to monitor soil temperature and soil moisture every 30 minutes at two depths (20 and 40 cm). The selection of sensors was based on previous experiences. Capacitance-based soil moisture and soil temperature monitoring devices were used in our study [19]. The soil sensors measured the frequency units of the capacitance circuit generated by the electrodes of a probe. The scale frequency was converted to volumetric water content in the soil, expressed as percentage. This conversion requires a calibration process that depends on soil composition among other factors [20]. To collect the information, we used addit S4 dataloggers connected to a hub of communications that both collects and sends data together to independent data retrieved from a local meteorological station placed within the study area. Overall, 64 sensors were installed surrounding the centre of each control plot (Fig. 2).

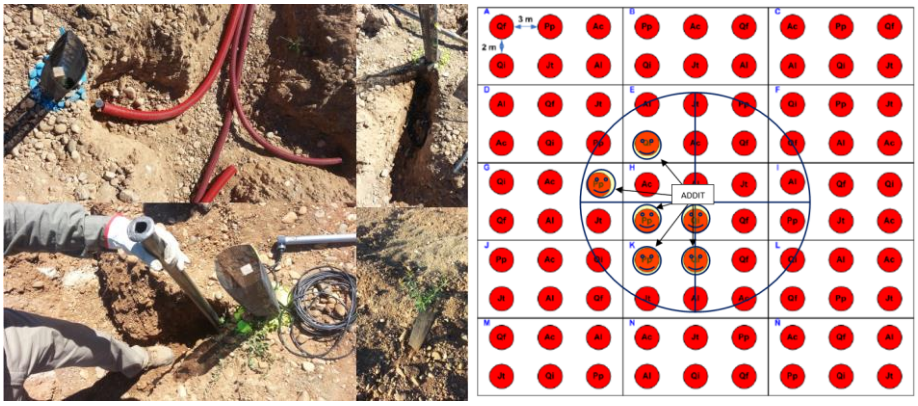


Fig. 2. Installation of the soil sensors (left) and diagram of the data capturing system for each plot (right).

3.2 Calibration of sensor records

Soil sensed measurements need to be converted into operational units easy. Sensor measurements showed alternative soil-dynamics pattern across the study area. The observed trends considerably varied both spatially and between soil layers (Fig. 3).

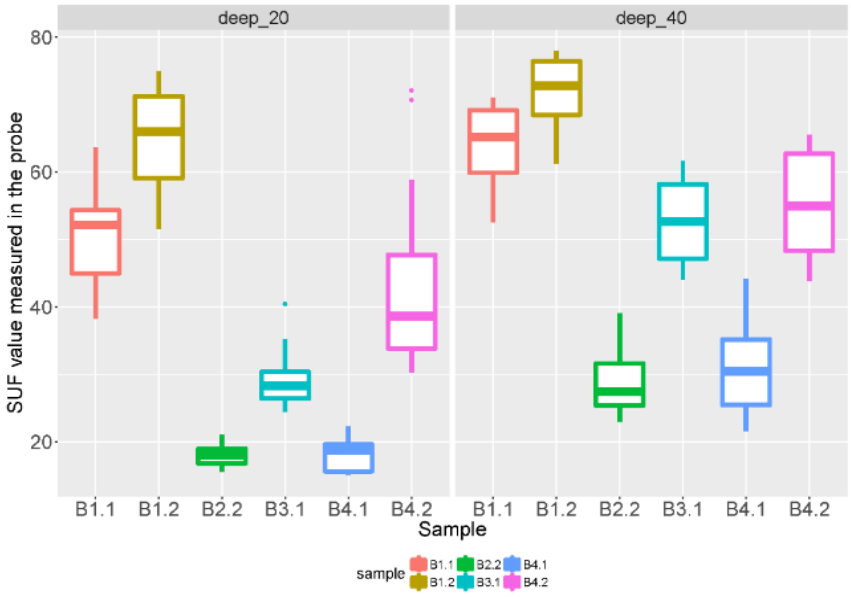
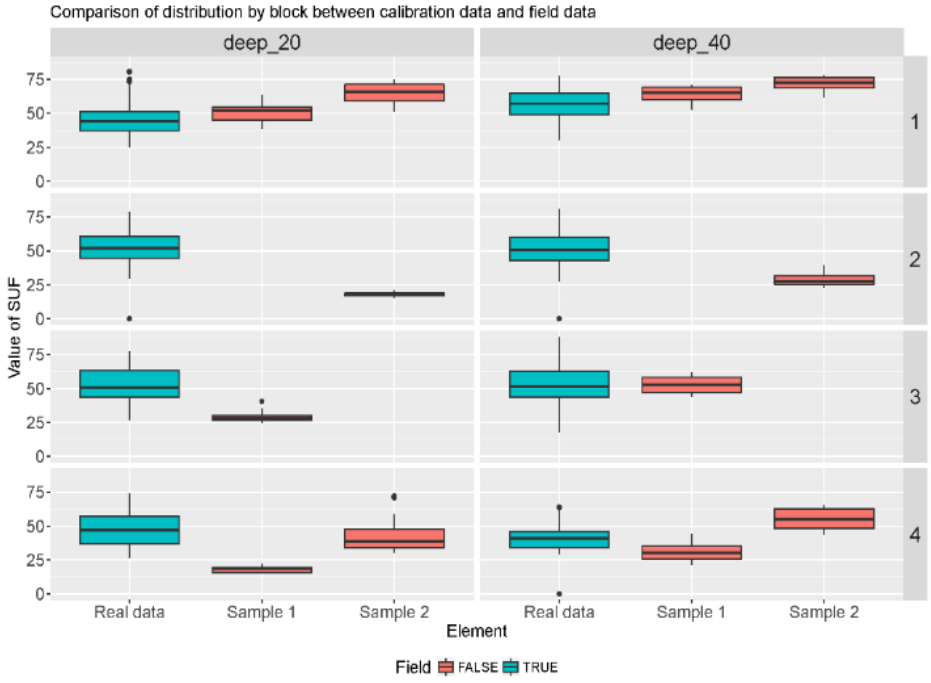


Fig. 3. Mean SUF value computed in the control plots.

Capacitance records were converted into soil volumetric water, and then into moisture content (expressed as %) through a calibration procedure based on soil samples. In our study, we collected two soil samples in each of the four control plots, and then, these measurements were used to calculate soil volumetric water. The sites selected for the sampling were representative when compared to the measured mean SUF value with the sensors. The process was as follows: soil samples were weighted several times in the laboratory before and after drying conditions. Indeed, soil sensor records were collected also before and after drying conditions. As a result, we modelled for each control plot the relationship between real soil volumetric content and sensors information along a gradient of moisture intervals (Fig. 4). Once model relationships were built-up, sensor measurements before and after the calibration test were converted and integrated into the data processing system.



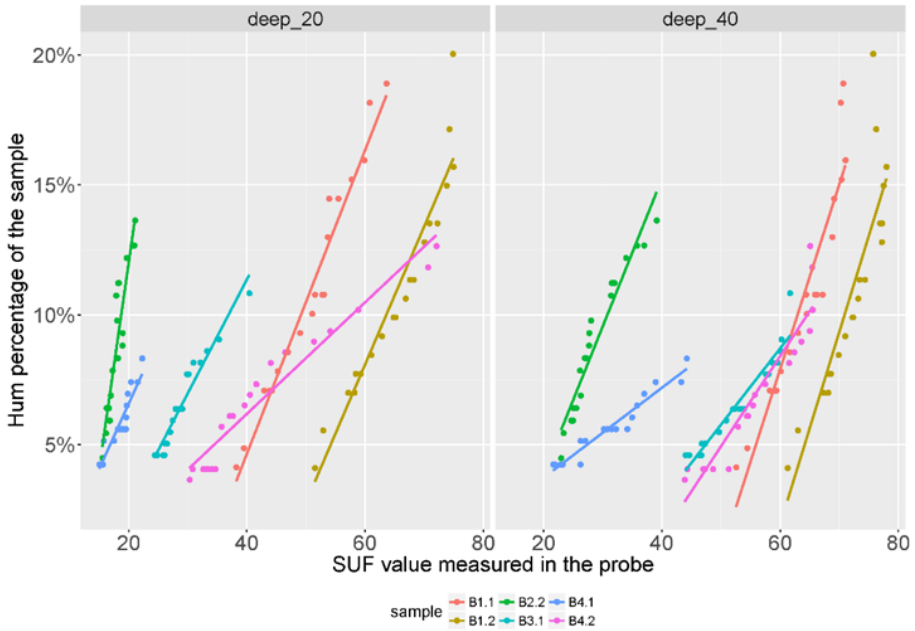


Fig. 4. Mean SUF value in the samples used for calibration measured in the field and in the laboratory before starting the drying process (above). Final models used to calibrate sensor measurements for each sample (below)

3.3 Atmospheric and climatic data

The correlation between sensed information and climatic variables need to be accounted for when interpreting sensor measurements. For that purpose, a climate station was installed in the center of the experiment. The station recorded the following variables of interest: temperature (°C), precipitation (mm), relative humidity (RH, %) and wind speed (Km h^{-1}). In this way, sensor measurements can be associated in real time to the observed conditions.

4 Theoretical approach

The availability of a huge amount of data coming from the sensor network is an important feature of the experiment. In the following sections, we describe in detail the methodology used for gathering and analysis data, as well as the theoretical and the empirical models that has allow us to obtain relevant conclusions on the real effect of the restoration techniques tested. The overall methodology was as follows:

1. The sensors collected the data in real time and send the information to the server.
2. Datasets were downloaded from the server on a monthly basis.
3. Filtering procedures were used to remove noise from the measurements

4. The filtered datasets were used in the model building phase
5. Statistical analyses were performed; the results were discussed within the group and with external experts to obtain the main conclusions.

4.1 Processing remote sensing data

All measurements, soil and climatic variables, were synchronized at a 30-minute interval: once the raw datasets were downloaded, the data was processed to generate one observation for each plant every 30 minutes. Due to the small intra-day variation of the data, we also computed mean values per day. Therefore, we defined two datasets, one including all the observations and another including daily average observations. The first was used to monitor moisture content 24 hours after each rainfall episode registered in climate station while the second was used for calculating the effect of treatments in soil temperature and soil volumetric water content.

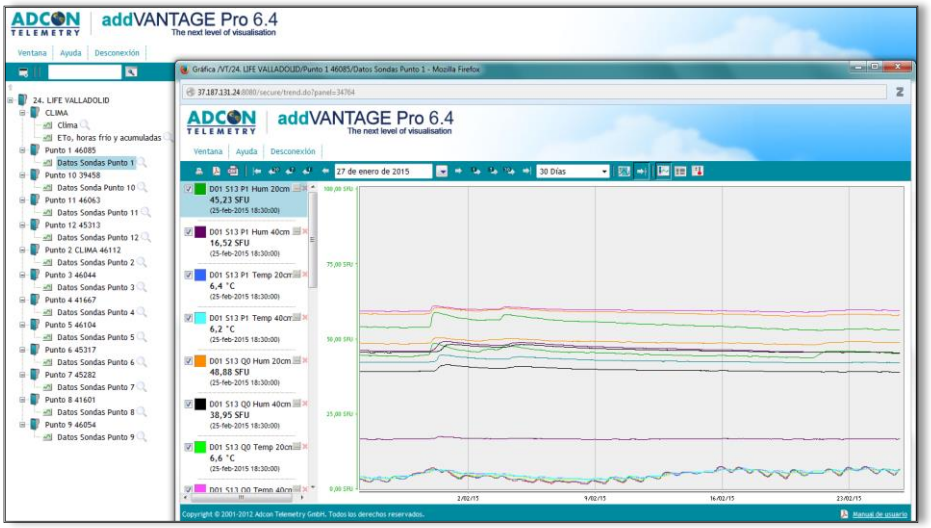


Fig. 5. Screenshot of the application that access, visualize and enable the downloading download of sensor measurements for further processing.

4.2 Modeling soil-water dynamics

4.2.1 Moisture increment after rainfall episodes

The analysis of moisture retention was performed for each month during two years (*n* from 1 to 24). The dependent variables were the difference between soil moisture measurements (*DifHum*) at both depths (Hum_{20} and Hum_{40}) between the period of observation and the period n hours before the observation. The independent variables

were the hourly rate of rainfall (*Rainfall*) in the n period (considering only rainfalls higher than 10 mm. per hour) prior to the observation.

The interaction between treatments (comparing each treatment with *NoTreat*) and unit of rainfall was also considered as well as soil moisture information: values at 20 and 40 cm-depth (Hum_{20} and Hum_{40}) n hours before the observation were also included in the models because it is expected that the effect depends on previous moisture content and to avoid bias due to other unobserved effects before the observation period.

The standard error was obtained by clustering per plant to correct for the violation of the independent and identically distributed error assumption. The proposed linear regression model based [Eq. 1] on ordinary least squares (OLS) fitting procedure for the n period (1:24) was as follows for the case of 20-cm depth:

$$Dif_{Hum_{20_n}} = \beta_{0n} + \beta_{1n}Treatment + \beta_{2n}Rainfall_n + \beta_{3n}Treatment * Rainfall_n + B_{4n}Hum_{20_n} + \beta_{5n_i}Rainfall_{n_i} + \beta_{6n_j}Rainfall_{n_j} + \varepsilon \quad (1)$$

where n corresponded to each month of the 1:24 interval, *i* controlled *Rainfall* between the observation and the *n* period before the observation, *j* controlled *Rainfall* between the *n*+1 period and *n*+24 periods and ε is the independent and identically distributed error term with mean = 0 and assumed non-constant variance. We were mainly interested in β_{3n} parameter to assess the efficiency of treatments.

4.2.2 Moisture and temperature soil temperature

Using the daily observations dataset, we estimated the soil volumetric content and temperature at 20 and 40-cm depth also. The response variables Tem_{20}, Tem_{40}, Hum_{20} and Hum_{40} were estimated using mixed-effects models [21] due to data hierarchy in our design. The levels were: individual (*IdTree*), control plot (*Plot*), species (*Specie*) and treatment (*Treatment*). We used the *NoTreat* dataset as reference level when fitting the model. This way, model coefficients can show the performance of treatments [22]. The models were fitted both in the original and logarithmic scale, altering the inclusion of factors in the fixed part. The model was as follows:

i. ME_1: A mixed-effect model including *Treatment* (our parameter of interest) in the fixed part [Eq. 2] and the rest of factors and several possible combinations as random effects [Eq. 3]:

fixed = "*Treatment*" (2)
random = c((1|*IdTree*), (1+*Treatment*|*Specie*), (1+*Treatment*|*Plot*), (1|*Month*)) (3)

ii. *ME_2*: factors *Plot* and *Specie* were added to the fixed part to highlight micro-site differences in our experimental design and assess the effect of species even the limited time interval since the planting [Eq. 4]. Factors *IdTree* and *Month* were included in the random-effects part as follows [Eq. 5]:

fixed = "*Treatment* + *Plot* + *Specie*" (4)
random = c(~ 1 |*IdTree*,~ 1 |*Month*) (5)

The statistical analyses were performed using R statistical software [23] and the software packages "ggplot2" [24], "lme4" [21] and "nlme" [25].

5 Results

5.1 Monitoring rainfall retention

The results of the regression model for the parameter of estimate (interaction treatment and rainfall) at the periods 6, 12, 18, and 24 hours before the observation are presented. Due to the complexity of the model, a graphical representation was decided to be the mean to assess the results (Fig. 6). The results were computed using a threshold of 10mm. to classify rainfall as "High" and "Low" (Fig. 7). Soil moisture increased in the presence of restoration techniques, particularly at 20 cm. in the following 24 hours after a 10 mm. rainfall. When considering the four blocks together the effect was significant for all the treatments at 20 cm although the effect was not equal for the different blocks. The use of retainers was more effective in Plot 2 and 3 at 20 cm while *Mycorrhiza* was the best practice to retain rainfall in Plot 4.

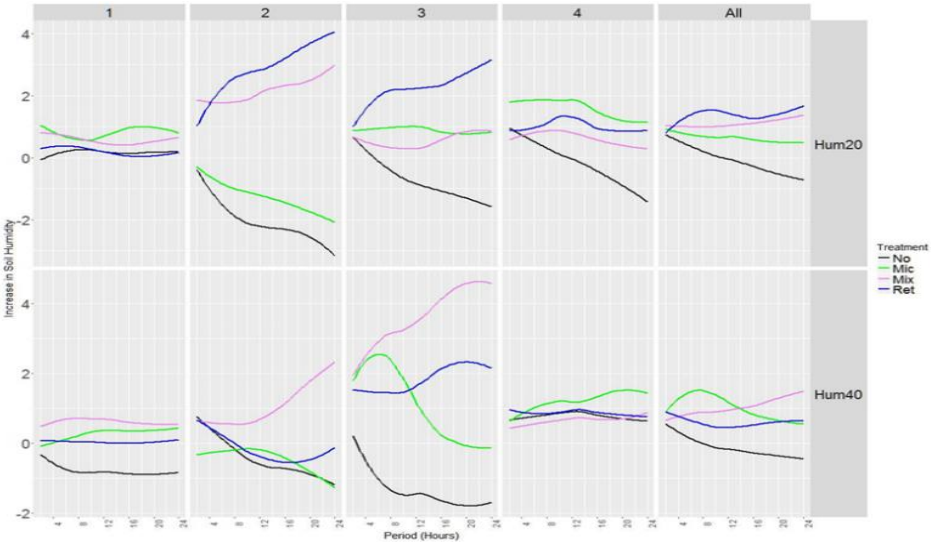


Fig. 6. Increment in soil moisture content after a rainfall episode. The results are presented for each control plot of the urban forest experiment.

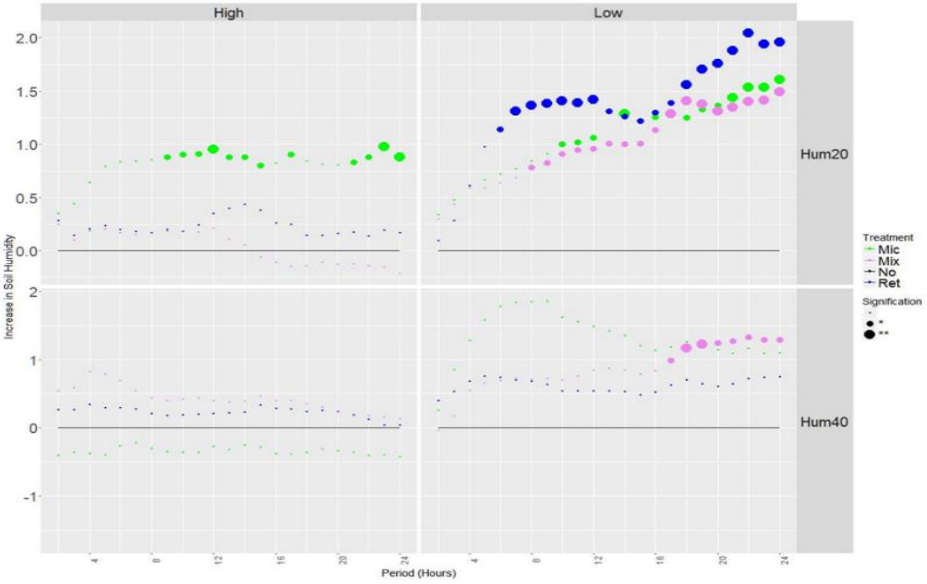
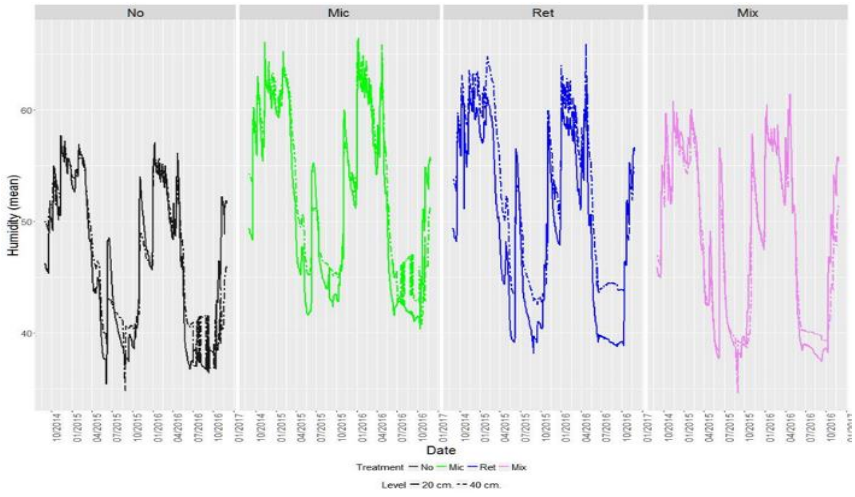


Fig. 7. Increment in soil moisture content considering the intensity of the rainfall episodes. The results are presented for rainfall above (High) and below (Low) 10mm.

5.2 Monitoring rainfall retention

The visual assessment of soil moisture content (Fig. 8-9) revealed the benefit of treatment alternatives compared to the benchmark case (*NoTreat*): the three alternatives show higher humidity at 20 cm. and 40 cm. and the effect was clearer for *Mycorrhiza* and *Retainer*



.

Fig. 8. Soil moisture content evolution by treatment during the experiment

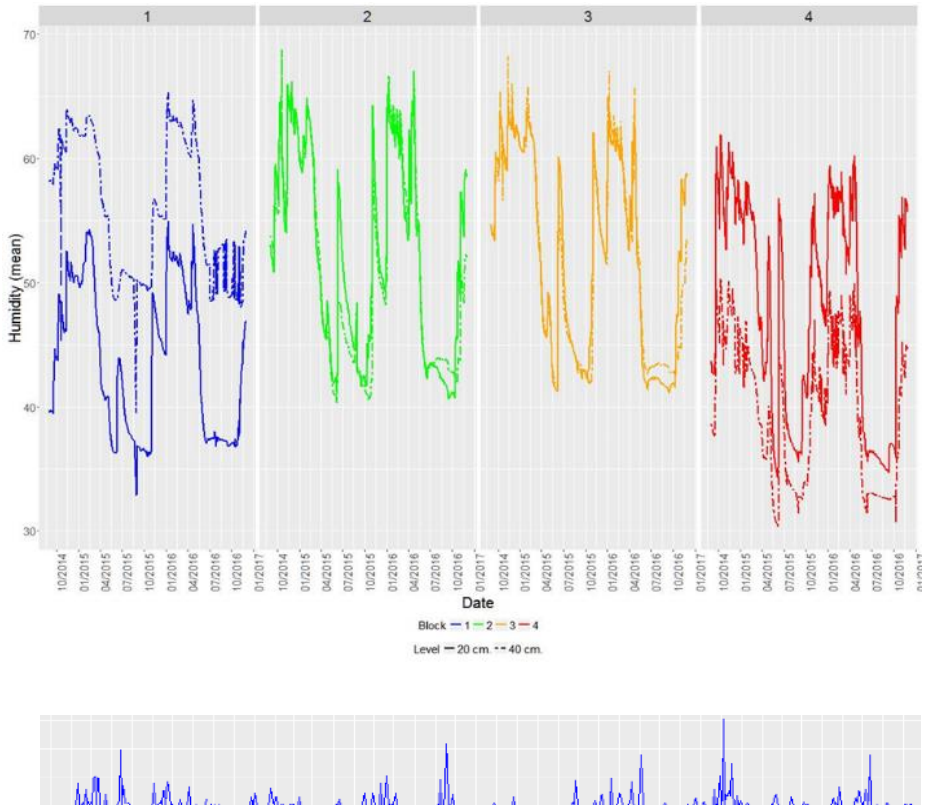


Fig. 9. Soil moisture content evolution by control plot during the two-year experiment (above) and the registered pluviometry (below)

The spatial variability of soil sensor measurements can be observed in Figure 9. The observed trend was similar for Plot 2 and 3 in terms of soil moisture content at 20 cm. and 40 cm. On the contrary, Plot 1 and 4 behaved very differently. In Plot 1, the humidity at 20 cm. level is much lower than at 40 cm. level and the changes are much smoother after a rainfall, particularly at the 40 cm. level. Conversely, humidity in the block 4 is higher at the 20 cm. level compared at the 40 cm. level and the changes at the 20 cm. level are very disruptive after the rainfall.

5.3 Modeling results and effectiveness of treatments

The presented plot-specific results showed the significance of the treatments using Plot #1 as level reference. Hereby, the coefficients for ME_2 model (Table 1) showed how soil water dynamics were highly dependent on microsite conditions. All treatments very highly significant (at least $p < 0.05$) at increasing both moisture content

and temperature while making moisture gradient more homogeneous from 20 to 40 cm depth. The model coefficients showed the minor contribution of treatments to increase moisture content at 20 cm depth. The results were not significant except for treatment *Mycorrhiza* (p value < 0.1) in ME_1 model (Table 2). When factors *Specie* and *Plot* were added to the fixed part of the model, the results showed the effectiveness of all treatments (significant at p value < 0.01) to reduce the moisture content difference between soil layers. All treatments significantly contributed (p value < 0.01) to increase soil temperature.

Table 1. Mean values, standard deviations (in brackets) and coefficients significance for ME_2

Factors	ME_2			
	$\log(Hum_{20})$	$Hum_{20} - Hum_{40}$	Tem_{20}	Tem_{40}
Mycorrhiza	0.099	-3.850	0.095	0.048
	(0.048)	(1.398)***	(0.160)	(0.152)
Retainer	0.051	-3.800	0.271	0.266
	(0.048)	(1.398)***	(0.160)*	(0.152)*
Mixed	0.027	-4.366	0.504	0.498
	(0.048)	(1.398)***	(0.160)***	(0.152)***
Plot 2	0.187	-7.211	-1.162	-1.096
	(0.048)***	(1.374)***	(0.160)***	(0.152)***
Plot 3	0.168	-8.317	-1.257	-1.130
	(0.048)***	(1.374)***	(0.159)***	(0.151)***
Plot 4	0.096	-6.209	-0.366	-0.368
	(0.048)**	(1.398)***	(0.160)**	(0.152)**
Log likel(10^3)	24,901	-92-385	-72.077	-68.178

Table 2. Mean values, standard deviations (in brackets) and coefficients significance for ME_1

Factors	ME_1			
	log(Hum_{20})	$Hum_{20} - Hum_{40}$	Tem_{20}	Tem_{40}
Mycorrhiza	0.099	-3.651	0.094	0.048
	(0.060)*	(2.072)*	(0.196)	(0.184)
Retainer	0.051	-3.601	0.270	0.265
	(0.071)	(1.648)**	(0.250)	(0.260)
Mixed	0.027	-4.167	0.504	0.497
	(0.083)	(2.180)*	(0.198)**	(0.185)***
Log likel(10^3)	24,924	-92,410	-72,113	-68.212

6 Discussion

Our study combined auxiliary and field information that was used to monitor the development of urban forests. In this regard, the combination of sensors and climate data is a support tool that can be used to e.g., optimise the watering needs spatially. The spatial variation of soil conditions and its implications when it comes to ensure the establishment of new urban forests are important. The effectiveness of treatments at improving the survival rate of tree species was already known but their contribution to minimise water run-off was clearly demonstrated in this study. Based on our results and on existing literature [10], resources in green urban planning should be devoted to improve soil preparation not only to adequate soil texture but also to create soil physiological uniformity. The application of the presented methodology in more controlled conditions would favour a better understanding of soil-water dynamics and reduce the level of complexity of the calibration step. This step is crucial in soil sensoring methodologies [23]. The investment in soil preparation can be reduced by testing resource-friendly solutions such as compost amendments [10] that can increase economic opportunities for local compost producers [24-25], which makes sense within the peri-urban environment.

Soil sensor measurements were effective at detecting micro-site variability, a matter of concern when it comes to early-stage plantations at a small scale [11]. The spatial variation of soil conditions highly influenced the observed soil-water dynamics as previous studies in the field acknowledged [13-26]). Soil texture and composition substantially varied across the experiment. It is worth to mention the impact of uncontrolled soil conditions throughout the study area. The substantial proportion of coarse elements has an impact in tree response as soil composition and nutrients highly affect

growth patterns [11-27]. In our case, the variation of soil properties really complicated the calibration process. This step was crucial to convert sensor measurements into variables of interest that decision makers can interpret. In the light of our results, the described calibration process can be improved if soil properties are as much homogeneous as possible across the experiment. Therefore, soil preparation should always be a preliminary step not only to improve the effectiveness of restoration techniques, but also to reduce uncertainty when interpreting soil sensoring measurements and water-soil dynamics. Beside this, the three tested treatments increased moisture content and survival rate, more or less significant, depending on the species and microsite properties.

The analyses on soil volumetric water content showed, in line with other studies [28], the benefit of restoration treatments. Even with the observed low increment in terms of soil water, the survival rate increased up to 10% and the infiltration of water became more tedious after rainfall episodes, leading to increase water availability and avoid runoff episodes. In the Mediterranean region, where water is by far the most limiting resource for plant growth, minimizing water runoff is crucial for tree species survival. Therefore, efforts in green urban planning when it comes to create new urban forest should be focused on early-stage soil preparation [25] as even in the absence of watering systems, plants have more chances to survive.

Green urban planning and land managers have the opportunity to optimize the creation of new urban forest areas by incorporating both feasible treatment solutions and innovative measuring systems capable to integrate multiple sources of data. In this perspective, the study represents a pioneer big data solution that combines detected information from soil sensors, climate data and field observations that, all together, are used to monitor and evaluate the establishment of a new urban forest.

In light of the results of this first article on the experiment, the importance of the spatial component was proved to be so relevant. The presented approach could be applied before planting operations take place and, in this way, the presented methodology could be regarded as a preliminary tool to assess soil moisture component spatially. As a result, planting operations, species selection or soil amendments could be determined based on the soil-water dynamics previously detected.

Acknowledgements

The study was developed within the frame of the Quick Urban Forest project (LIFE12 ENV/ES/000092) funded by the Life + Programme of the European Commission. The research was supported by the Council of Valladolid and the Regional Government of Castilla y León.

References

1. Carter, J.G.: Climate change adaptation in European cities. Current Opinion in Environmental Sustainability 3(3), 193–198 (2011). doi:10.1016/j.cosust.2010.12.015
2. Lafortezza, R., Carrus G., Sanesi G., Davies C.: Benefits and well-being perceived by people visiting green spaces in periods of heat stress. Urban Forestry & Urban Greening 8(2), 97–108 (2009). doi: 10.1016/j.ufug.2009.02.003
3. Churkina, G.: Modeling the carbon cycle of urban systems. Ecological Modeling 216(2),107–113 (2008). doi: 10.1016/j.ecolmodel.2008.03.006
4. Ciscar, J., Iglesias, A., Feyen, L., Szabó L., Regemorter, D., Amelung, B.: Physical and economic consequences of climate change in Europe. PNAS 108:7 (2011).
5. European Environment Agency (EEA).: Urban Sprawl in Europe. The Ignored Challenge. EEA. København. 2006.
6. Foley, J.A., Defries, R., Asner, G.P., Barford, C., Bonan, G., Carpenter, S.R., … Snyder PK.: Global Consequences of Land Use. Science. 309, 570-574 (2005). doi: 10.1126/science.1111772
7. Konijnendijk, C.C., Ricard, RM., Kenney, A., Randrup, T.B.: Defining urban forestry—a comparative perspective of North America and Europe. Urban Forestry & Urban Greening 4(3-4), 93–103 (2006). doi:10.1016/j.ufug.2005.11.003
8. Salvati, L., Ranalli, F., Carlucci, M., Ippolito, A., Ferrara, A., Corona, P.: Forest and the city: A multivariate analysis of peri-urban forest land cover patterns in 283 European metropolitan areas. Ecological Indicators 73, 369–377 (2017). doi:10.1016/j.ecolind.2016.09.025.
9. Tomao, A., Quatrini, V., Corona, P., Ferrara, A., Salvati, L.: Resilient landscapes in Mediterranean urban areas: Understanding factors influencing forest trends. Environmental Research 156, 1–9 (2017). doi:10.1016/j.envres.2017.03.006
10. De Lucia, B., Cristiano, G., Vecchietti, L., Bruno, L.: Effect of different rates of composted organic amendment on urban soil properties, growth and nutrient status of three Mediterranean native hedge species. Urban Forestry & Urban Greening 12, 537–545 (2013). doi:10.1016/j.ufug.2013.07.008
11. Maestre ,F.T., Cortina, J., Bautista, S., Bellot, J., Vallejo, V.R.: Small-scale environmental heterogeneity and spatio-temporal dynamics of seedling establishment in a semiarid degraded ecosystem. Ecosystems 6, 630-643 (2003).
12. Bogena, H.R., Huisman, J.A., Oberdörster, C., Vereecken, H.: Evaluation of a low-cost soil water content sensor for wireless network applications. Journal of Hydrology 344, 32–42 (2007). doi:10.1016/j.jhydrol.2007.06.032
13. Adamchuk, V., Hummel, J., Morgan, M., Upadhyaya, S.: On-the-go soil sensors for precision agriculture. Computers and Electronics in Agriculture 44, 71–91 (2004). doi:10.1016/j.compag.2004.03.002
14. De la Barrera, F., Rubio, P., Banzhaf, E.: The value of vegetation cover for ecosystem services in the suburban context. Urban Forestry & Urban Greening 16, 110–122 (2016). doi:10.1016/j.ufug.2016.02.003
15. So, T., Ruthrof, K.X., Dell, B.: Seed and seedling responses to inoculation with mycorrhizal fungi and root nodule bacteria: implications for restoration of degraded Mediterranean-type Tuart woodlands. Ecological Management & Restoration 12, 157-160 (2011). doi: 10.1111/j.1442-8903.2011.00590.x
16. Navarro, R.M., Del Campo, A., Cortina, J.: Factores que afectan al éxito de una repoblación y su relación con la calidad de la planta. In: *Calidad de planta forestal para la restau-*

ración en ambientes mediterráneos:31-47 (2006). Serie Naturaleza y Parques Nacionales. [In Spanish].
17. Vereecken, H., Huisman, J., Bogena, H., Vanderborght, J., Vrugt, J.: On the value of soil moisture measurements in vadose zone hydrology: a review. Water Resources Research 44, 1– 21 (2008).
18. Marín, J., Parra, L., Rocher, J., et al.: Urban Lawn Monitoring in Smart City Environments. Journal of Sensors 18, 1-16. doi:10.1155/2018/8743179.
19. AQUACHECK.: Capacitance sensor technical instrucctions 2014. Available at http://www.aquacheck.co.za/soil-moisture-probes/
20. Bogena, H.R., Huisman, J.A., Oberdörster, C., Vereecken, H.: Evaluation of a low-cost soil water content sensor for wireless network applications. Journal of Hydrology 344, 32–42 (2007). doi:10.1016/j.jhydrol.2007.06.032
21. Bates, D., Maechler, M., Bolker, B., Walker, S.: Fitting Linear Mixed-Effects Models Using lme4. Journal of Statistical Software 67, 1-48 (2015). doi:10.18637/jss.v067.i01.
22. Mehtätalo, L., Lappi, J.: Forest Biometrics with Examples in R. Book available at http://cs.uef.fi/~lamehtat/documents/book.pdf (last access on June 26th 2018).
23. Sheng, W., Sun, Y., Schulze-Lammers, P., Schumann, H., Berg, A., Shi, C., Wang, C.: Observing soil water dynamics under two field conditions by a novel sensor system. Journal of Hydrology 409, 555–560 (2011). doi: 10.1016/j.jhydrol.2011.08.065.
24. Cogger, C.G.: Potential Compost Benefits for Restoration Of Soils Disturbed by Urban Development. Compost Science & Utilization 13, 243-251 (2005).
25. Cortina, J., Amat, B., Castillo, V., Fuentes, D., Maestre, F.T., Padilla, F.M., Rojo, L.: The restoration of vegetation cover in the semi-arid Iberian southeast. Journal of Arid Environments 75, 1377–1384 (2011). doi:10.1016/j.jaridenv.2011.08.003
26. Huisman, J.A., Snepvangers, J.J.J.C., Bouten, W., Heuvelink, G.B.M.: Mapping spatial variation in surface soil water content : comparison of ground-penetrating radar and time domain reflectometry. Journal of Hydrology 269, 194–207 (2002).
27. Phillips, J.D., Lorz, C.: Origins and implications of soil layering. Earth-Science Reviews 89, 144–155 (2008). doi:10.1016/j.earscirev.2008.04.003.
Huttermann, A., Zommorodi, M., Reise, K.: Addition of hydrogels to soil for prolonging the survival of Pinus halepensis seedlings subjected to drought. Soil & Tillage Research 50, 295–304 (1999).

Aplicación de eficiencia energética y generación distribuida con micro sistemas fotovoltaicos para el uso óptimo de la energía

Napoleón Vicente Blanco Orozco [1]

[1] Doctor en Ciencia del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Ingeniero eléctrico y Máster en Gerencia de Proyectos de Desarrollo. Docente investigador de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI), Facultad de Electrotecnia y Computación, Jefe de Departamento de Ingeniería Eléctrica, Nicaragua. Correo electrónico: blanconapoleon@yahoo.com, napoleon.blanco@fec.uni.edu.ni.

Abstract. En este artículo se empleó el método de estudio de casos y la simulación empleado RETScreen Expert para evaluar medidas para el uso eficiente de la energía eléctrica, principios bioclimáticos y la implementación de micro generación con un sistema fotovoltaicos para suplir los requerimientos de energía eléctrica del departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Nacional de ingeniería en Nicaragua. Se obtuvo como resultado que es posible el 15 % de ahorro de energía eléctrica al emplear tecnología LED en la iluminación, mejora en el aislamiento de paredes, techos, reducción de infiltraciones de puertas y el empleo de equipos de climatización de alta eficiencia.

Keywords: energía, eficiencia energética, energía fotovoltaica.

1 Introducción

La tierra es un planeta que está en constante transformación por procesos evolutivos naturales, pero la actividad antropogénica está contribuyendo al aceleramiento y desequilibrio del mismo. Los cambios climáticos ocasionados por el calentamiento global son entre algunos de los temas que están en agendas de organismos internacionales, por tanto, muchos científicos, profesionales, técnicos se reúnen a través de congresos, seminarios, jornadas científicas para analizar la situación y establecer algunos mecanismos y estrategias para mitigar el avance de la catástrofe mundial.

En la COP23: Conferencia de la ONU sobre el Cambio Climático de 2017 se replanteó como reto la estabilización de las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera a niveles que impidan interferencias antropogénicas peligrosas para el sistema climático de la Tierra. En este sentido, la segunda fuente de emisiones de GEI en Nicaragua son los sectores agricultura y energía con 19.4% del total de CO_2 equivalente producto de la fermentación entérica del ganado y el uso de los derivados

del petróleo por parte de la industria eléctrica y el transporte [1]. Por tanto, una de las formas de evitar la emisión de GEI es la disminución del consumo de energía eléctrica y el fomento al empleo de fuentes alteñas de energía.

La demanda de energía eléctrica y potencia a nivel del Sistema Interconectado Nacional (SIN) de Nicaragua está en constante crecimiento. Se espera un aumento promedio anual del 4.5% de la demanda (potencia) y del 4.8% para la energía [1] [2]. Por lo tanto, la capacidad del SIN deberá aumentar para suplir el aumento anual de la demanda de energía. No obstante, el reto es aumentar la capacidad instalada atrayendo inversión en plantas de generación de energía eléctrica que empleen recursos energéticos renovables e implementar medias de uso eficiente de la energía para disminuir la demanda.

Por lo que, dada la problemática planteada del aumento de la demanda de energía eléctrica y que como parte de la solución se propone disminuir la cantidad de energía eléctrica a demandar con la implementación de medidas de eficiencia energética, es que surge el emprendimiento de un trabajo de investigación para presentar medidas para el uso eficiente de la energía eléctrica a través de un estudio de caso del emplazamiento del departamento de Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Electrotecnia y Computación (FEC) de la Universidad Nacional de Ingeniería y se proyecta la utilización de la energía solar de forma pasiva a través de principios bioclimáticos; lo que implicará tener en cuenta las técnicas naturales de acondicionamiento en un rediseño para obtener un uso eficiente de la energía.

Además, en este estudio se utilizó la simulación del empleo la energía solar para suplir los requerimientos en cuanto a climatización e iluminación con lo que se procura reducir substancialmente el consumo energético de energía convencional. Adicionalmente, al reducir la demanda de energía se disminuyen las emisiones de CO_2 y otros agentes de polución a la atmósfera partiendo de la utilización de la energía solar. Por otra parte, la utilización de la energía solar activa se propicia con la integración de los sistemas de energía solar a los sistemas convencionales de producción de electricidad usando módulos fotovoltaicos y considerándolos como un componente más del edificio. Ahora bien, un diseño de un recinto energéticamente eficiente pasa por el aprovechamiento de los recursos naturales del lugar del emplazamiento del local; para ello es necesario que se den las condiciones adecuadas para que estos recursos puedan ser usados.

Por tanto, con la presentación de los resultados de este estudio se pretende indicar que es posible la reducción de la demanda de energía eléctrica con la implantación de sustitución de equipos eléctricos por sus equivalentes más eficientes; además, que el empleo de materiales de construcción energéticamente eficientes se traduce en menor demanda energética que se sostiene financieramente a través del ahorro de costos en el consumo de energía eléctrica.

2 Estado del arte

El ahorro y la eficiencia energética en los edificios son elementos esenciales para ayudar a no incrementar el fenómeno del calentamiento global puesto que es posible proveer los mismos servicios energéticos con un menor consumo de energía [3]. Así, los edificios deben conceptualizarse con una filosofía de reducción del consumo de energía y para brindar la funcionalidad y el confort térmico se deben considerar elementos de diseño y construcción que eviten la pérdida o ganancia de calor según convenga, se empleé ventilación e iluminación natural y además se considere el uso de energías renovables para satisfacer la demanda de energía conexa al edificio [4].

De manera que, en el caso de la iluminación como uso final de la energía que genera gran cantidad de Gases de Efecto Invernadero (GEI) se estima que representa el 19% del consumo de energía a nivel mundial y que es un consumo que aun hoy día usa tecnología deficiente desde el punto de vista energético, a pesar de que tiene un potencial de ahorro alto. No obstante, en el área de la iluminación se cuenta actualmente con nuevas tecnologías como las lámparas LED y sistemas de control que permiten ahorros de energía de hasta un 80% [5]. Así mismo, en [6] se coincide en la participación del consumo total de energía de parte de la iluminación y por tanto, en la importancia de actuar en la mejora de este aspecto de la demanda; sobre todo, revisando los niveles de iluminación empleados para evitar la generación de excesivos niveles en áreas que no lo necesitan. Además, se debe hacer uso de la iluminación natural, de buenas prácticas del uso energético, del empleo de tecnologías de regulación y control (que permiten ahorro hasta del 60%) y el empleo de tecnología LED (que permite un ahorro de energía de hasta el 80%).

Por otra parte, para el ahorro de energía con poca inversión adicional se cuenta con los principios de la arquitectura bioclimática que promulga el uso de elementos de diseño tales como la orientación adecuada del edificio y el uso de muros que aíslen al edificio de las temperaturas exteriores [7]. De modo que, por ejemplo, en las ciudades inteligentes por medio de aplicación de tecnologías que hacen un uso más eficiente de la energía se lograría la reducción del consumo de edificios para aportar en su eficiencia energética recursos naturales y energéticos [8]. Así mismo, las principales líneas de acción incluyen el diseño y aspectos constructivos del edificio, implementación de sistemas de alta eficiencia, mantenimiento, la inserción de fuentes renovables de energía y soluciones bioclimáticas [9].

Así, los principios bioclimáticos son acciones que permiten capturar, almacenar y distribuir la energía sin el aporte de equipos o instalaciones externas. Entre los principios bioclimáticos están el aislamiento térmico eficiente, aprovechamiento de la luz natural y la orientación adecuada como medidas de arquitectura bioclimáticas que favorecen el ahorro de energía [8]. De forma similar, se recomiendan utilizar buenas prácticas de arquitectura para la generación o captación de energía de forma natural y así aprovechar la capacidad de conservación de la energía [10]. En este mismo sentido, la energía solar pasiva implica el uso de fuerzas de la naturaleza no electromecánicas para

mantener las condiciones de confort en un edificio con el mínimo empleo de equipos como ventiladores, aires acondicionados y sistemas de control [11].

Además, en el caso de las edificaciones para conseguir un mejor rendimiento energético en la climatización es menester reducir las aportaciones de calor del medio externo ya por ejemplo, en la región centroamericana se destina más del 60 % de su demanda energética a la climatización; sumado a lo anterior, se puede utilizar la climatización pasiva que es el uso de características de diseño de los emplazamientos para mantener las condiciones de confort sin la incidencia de dispositivos convencionales de refrigeración [12].

En definitiva, la energía alternativa más económica es la que no se emplea y este es uno de los propósitos de la eficiencia energética para optimizar el consumo de recursos energéticos relacionados a los edificios [13]. Se pueden obtener ahorros significativos en los edificios reduciendo el impacto del ambiente exterior en el interior de los recintos; la clave está en el aislamiento y se pueden implantar medidas como: aumento de hermeticidad, recuperación de calor, iluminación mejorada, una mayor eficiencia de ventilación y aire acondicionado [14]. Así, la mejor vía para la eficiencia energética es la reducción del consumo de energía; lo que se logra con la aplicación de medidas técnico organizativas de acomodo de carga junto con soluciones de bajo costo y como parte del proceso de aplicación de estas medidas de ahorro se debe hacer una comparación diferencia de una situación base y una mejorada que permita evaluar la reducción energética lograda [15].

Por otra parte, la presunción de que un edificio sostenible energéticamente resulta en una inversión de mayor costo debe analizarse de forma integral para concluir que no es necesariamente así. Un edificio tiene demandas energéticas de diferentes tipos como la climatización, ventilación, alumbrado y otros equipos de fuerza y si logramos que la demanda de energía de cada tipo sea reducida en alguna proporción que puede oscilar entre un 30 % y un 70 % en suma habrá un ahorro total [16] y este ahorro compensaría el sobre costo de inversión sostenible. Además, un edificio sostenible resulta rentable para el que lo construye, para el que los opera, para los usuarios de este y además ofrece un beneficio ambiental para la sociedad en general. Finalmente, la acción del ahorro de energía se convierte hoy día en una fuente de energía para hacer frente al crecimiento de la demanda de portadores energéticos [17].

3 Metodología

Para lograr los objetivos planteados inicialmente se realizó un estudio bibliográfico de las distintas formas de ahorro de energía a través de los principios bioclimáticos, de

energía solar activa y pasiva, de gestión y de ahorro de la energía eléctrica y eficiencia energética en equipos eléctricos.

Luego, utilizando el método de estudio de casos se realizó la simulación del comportamiento energético de las medidas propuestas de ahorro de energías en un emplazamiento de estudio utilizando el programa RETScreen Expert. Se propuso como objetivo general del caso de estudio la disminución de un 15 % en el consumo de energía eléctrica. El proceso de planteamiento del estudio de caso usando simulación inicia con la disposición de la ubicación del emplazamiento en estudio indicando la posición directamente sobre el mapa SIG de que dispone el programa. Con la ubicación precisa del local se obtienen datos como la radiación solar y velocidad del viento necesarios para el estudio de la factibilidad del empleo de fuentes alternas de energía para el suministro hibrido a la instalación con esquema de generación distribuida; así mismo, los datos meteorológicos asociados al emplazamiento son necesarios para en análisis de factibilidad de las medidas de eficiencia energética.

A continuación, se identificaron los datos del emplazamiento necesarios para el estudio de la factibilidad de las medidas de eficiencia energética, en el siguiente acápite se describen con detalles los datos del caso de estudio. Seguidamente, se detalló el modelo energético con la filosofía de la descripción de un caso base de comparación (business as usual) sin medidas de eficiencia energética y el uso de combustibles fósiles como fuente de generación de energía eléctrica contra el caso propuesto con la implementación de medidas de eficiencia energética, uso de equipos de alta eficiencia y uso de fuentes alternas de energía. En la definición del modelo de análisis también se describen los energéticos utilizados en forma de combustibles o energía eléctrica y los tiempos y horarios de ocupación; se describe el uso que se le da a los energéticos principalmente para climatización del local. En la climatización, se propuso el cambio de equipos de rendimiento estándar por equipos con mayor eficiencia energética.

También, se simularon cambios en el uso final de la energía como lo son el cambio material de las paredes con una mayor resistencia de transmisión de calor que favorece al ahorro de la energía en la climatización, uso de aislamiento en el cielo raso, sellado de infiltración de aire natural y sellado de ventanas y puertas que provocan perdidas de enfriamiento y recarga de la carga de climatización. En el sistema de iluminación, se simuló el cambio de lámparas fluorescentes por lámparas led con mayor rendimiento de lúmenes de salida por watts de energía utilizado.

Así mismo, se propone la integración de un sistema solar de generación de electricidad de 0.9 KW como alternativa al uso de energía convencional para lograr un ahorro con el suministro de energía solar fotovoltaica con un precio promedio menor a la anergia comercial. En el análisis financiero de la factibilidad de implementación de medidas de eficiencia energética y principios bioclimáticos se emplea el análisis de costos diferenciales.

3.1 Datos del caso de estudio

Caso base

Tipo de Proyecto: de eficiencia energética
Ubicación: Área de docentes del departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad Nacional de Ingeniería. Managua, Nicaragua
Tipo de instalación: comercial/ Institucional
Tamaño de instalación = 40 metros cuadrados
Datos meteorológicos: estación del aeropuerto Augusto Cesar Sandino
Tipo de combustible: electricidad

Caso propuesto

Tipo de combustible: electricidad e incluir energía renovable proveniente de un sistema fotovoltaico.

Modelo de energía

Incluir costo de la energía eléctrica promedio 0.2 $/KW-HR para la energía comercial y un costo de 0.10 $/KW-HR para la energía suministrada por el sistema fotovoltaico. En ambos casos propuestos y base se considera como fuente la energía eléctrica.

Horario

Horarios de oficina de ocho horas días de lunes a viernes con un uso de los recursos energéticos en la instalación para un total de 8,760 horas al año. La temperatura de operación o de ajuste del sistema de climatización es de 26 grados centígrados.

Sistema de enfriamiento

Coeficiente de rendimiento estacional de 2.5 para el sistema actual y 2.8 para dos equipos de reemplazo de 24,000 BTU/HR

Cobertura de edificios

Se considera que en el caso propuesto se aumenta la resistencia del material de las paredes lo que se consigue un material con mejor resistencia de asilamiento pasando de 1.8 a 2.11 m^2 - ^{o}c / w que proporciona menor carga de enfriamiento al impedir la entrada del calor externos al recinto. La resistencia del material del techo se considera mayor considerando el uso de un aislante en el caso propuesto que proporciona menor carga de enfriamiento al impedir la entrada del calor externos al recinto. El mismo procedimiento se usa en las puertas, definiendo el área en ambos casos y se define la resistencia de aislamiento o coeficiente de transmisión.

Iluminación

El área de piso a iluminar es de 50 m^2
La carga de iluminación potencia instalada por unidad de superficie.
Caso base = 8*80 =640 watt/50 =12.8 watt/m^2
Caso propuesto reducción de consumo usando lámparas LED = 8*40 =320 watt/50 =6.4 watt/m^2
Ahorro = 320 watts* (8*5*4*12) = 614,400 /1000= 614 Kwh * 2 córdobas =1228.8/30 = US $ 40.96 dólares anuales
Horas de operación diaria: 8 horas
Costos incrementales por la sustitución de luminarias fluorescentes de 40 watts por LEDS T-8 DE 18 Watts. Ahorro con la sustitución por LEDS T-818 Watts

4 Resultados y discusión

Partimos de que la concepción general de eficiencia energética como una forma de consumir menos energía realizando las mismas actividades en un edificio, esto es, ser más eficiente en el uso de la energía, debe ser acompañada con un cambio de paradigma de consumo hacia la austeridad evitando el exceso y el desperdicio de la energía. Es por tanto, con la anterior filosofía que se analizan los resultados del caso de estudio de este artículo.

Según la simulación de las diferentes medidas de eficiencia energética se obtuvo como resultado que al comparar el caso base con el caso propuesto se pasó de un consumo de 9,440 kwh a 8,024 kwh se obtuvo un ahorro total de 1,416 kwh anualmente que corresponde al 15 % que fue el objetivo planteado con el estudio del caso presentado.

La implementación de principios bioclimáticos para el ahorro de energía eléctrica tales como el cambio del material de las paredes con una mayor resistencia de aislamiento, polarizado de los ventanales en paredes y puertas para obtener una mayor resistencia de transmisión de calor externo, disposición de material aislante en el techo y con el sellado de fisuras en las puertas para evitar las infiltraciones de aire externo al recinto con mayor temperatura y por ende, aumento de la carga de enfriamiento resulta en un ahorro total del 19.6 % de la energía demandada por el recinto pasando de 2,952 a 2,372 kwh con un ahorro de 580 kwh ahorrados anualmente.

Las medidas bioclimáticas consideradas aquí coinciden con lo planteado en [8] al indicar que estos principios que se incorporan de manera natural al edificio permiten reducir la demanda de energía eléctrica y que por ejemplo el cambio de envoltura térmica tiene el potencial de reducción energética de hasta un 70 % y también que las herramientas de simulación ayudan a evaluar las estrategias de ahorro energético. De

la misma forma, existen principios de arquitectura bioclimática que ahorran energía como lo es el uso del color blanco en paredes exteriores para tener un efecto de reflexión a la radiación exterior del sol u orientando las áreas de oficina al norte puesto que serán más frescas en verano y más frías o húmedas en invierno y adoptar en el exterior del edificio zonas con jardines para bajar la temperatura ambiente unos grados en verano lo que puede reducir en un 25 % las transferencias de calor desde el exterior [7] [9].

Por otra parte, otra forma de ahorrar energía en un recinto es la implementación de elementos de protección solar que permiten reducir la carga de los equipos de climatización; además, con estos dispositivos se puede obtener la reducción de la iluminación natural interior necesaria para cumplir requisitos específicos para cada aplicación espacial y la inversión necesaria para la implementación en un edificio puede ser amortizada en menos de dos años [18]. Además, se pueden implementar acciones naturales como fachadas translucidas que ofrecen diferentes respuestas acondiciones térmicas dependiendo de las condiciones climáticas donde se ubica el edificio y mejora la higiene, ventilación, confort térmico y protección solar [19].

Además, algunos expertos opinan que la eficiencia energética debe concebirse desde el inicio del diseño de un recinto; una opción es el desarrollo y la implementación de un diseño integrado que implica el trabajo interdisciplinario de profesionales que intervengan en la evaluación de eficiencia energética y en el diseño arquitectónico, estructural y constructivo de forma que cada profesional integrante aporte a la optimización de los recursos, incluyendo los energéticos, desde su experiencia especifica [20]. Además, se recomienda el empleo de herramientas informáticas que ayudan a diseñar y evaluar la implementación de eficiencia energética tal y como se ha hecho en este articulo puesto que en algunas ocasiones la implementación de medidas de eficiencia energética no resulta rentables financieramente. En este mismo sentido, las aplicaciones de medidas de eficiencia energética pueden dar como resultado una reducción del consumo de energía de aproximadamente el 50% para los edificios de oficina, pero es un desafío lograr un 50% de reducción del uso de energía en climas en los que es necesario el empleo de climatización [20].

Por otro lado, los sistemas de climatización suelen consumir un 30 % de la energía eléctrica demandada por un edificio; por lo tanto, el rendimiento óptimo de estos sistemas es importante para ahorrar energía, reducir las emisiones y obtener ahorros sin sacrificar confort térmico y buena calidad ambiental interior [12]. Y para conseguir mayor rendimiento de los sistemas de climatización se debe reducir el aporte energético de calor; y lo anterior se logra con principios bioclimáticos como la reducción de infiltraciones que permiten la entrada de aire externo a una mayor temperatura lo que suma una mayor carga de refrigeración [10].

En el caso de la iluminación el principio general es el aprovechamiento al máximo de la luz solar natural siempre que sea posible. Pare este caso de estudio se planteó la

sustitución de las luminarias de fluorescentes con tubos de tipo T8 con balastro electrónico por luminarias tipo LED que producen mayor salida de lúmenes por watt de potencia consumida obteniéndose un ahorro del 43% en este rubro al pasar de un consumo de 14.764 kwh a 8,410 kwh con un ahorro de 6,354 kwh anualmente. La iluminación es uno de los usos finales de energía con mayor potencial de ahorro [3] lo que se consigue con el uso de nuevas tecnologías que permiten un mayor nivel y calidad de iluminación con menor consumo como la tecnología de diodos LED que pueden proporcionar hasta un 80 % de ahorro y que se usó precisamente en este caso de estudio. También, el uso de lámparas eficientes en la iluminación permite un ahorro entre un 10 y 15 % [5] y sumado a esto se debe cuidar que el diseño de un sistema de iluminación contemple el ajuste adecuado del deslumbramiento, reflexión, apariencia, temperatura de color, índice de rendimiento del Color (IRC o Ra).

Además, como complemento de las medidas de eficiencia energética se integró un pequeño sistema fotovoltaicos de 0.9 KW con un costo de generación de energía eléctrica menor al de la energía comercial comprada a la empresa distribuidora de 0.2 $/kwh. Esta integración de generación distribuida es coincidente con lo planteado en [7] incluyendo esta medida como parte de acciones en edificios para aportar en su eficiencia energética.

Por otro lado, con las medidas de eficiencia energética consideradas se obtiene una reducción anual bruta de emisiones de GEI de 4.1 ton CO_2.

Del análisis financiero se obtuvo que es rentable el desarrollo de las medidas de eficiencia energética propuestas ya que para un horizonte de planeamiento de 15 años con una tasa de descuento del 9 %, una tasa de inflación del 2 %, una relación de deuda del 70 % se obtuvo un VAN positivo de 6,452 y una TIR de 18.8 %; por tanto, se puede considerar factible financieramente la propuesta de las medidas de eficiencia energética simuladas.

5 Conclusiones

El propósito de este artículo fue comprobar si era posible la reducción de la demanda de energía eléctrica con la implementación de medidas de eficiencia energética y la aplicación de principios bioclimáticos en un recinto y luego de la simulación del estudio de caso se obtuvo que efectivamente es posible ahorrar energía con las acciones previstas cumpliéndose el objetivo propuesto del 15 % de ahorro de energía eléctrica.

La aplicación de principios bioclimáticos que incluyen la sustitución de materiales de construcción por aquellos que presenten un mayor aislamiento del recinto de las temperaturas externas favorece a la reducción de la carga de enfriamiento de un recinto y

a la mejoría de condiciones de confort de la ocupación de estos espacios y que permiten el ahorro de energía.

La sustitución de equipos de iluminación por las tecnologías emergentes como las lámparas LED permite un ahorro de energía eléctrica. Así mismo, la adquisición de equipos de climatización con un mayor coeficiente de rendimiento estacional y con una calificación energética cercana a las letras A y B se traduce en ahorro de energía eléctrica durante la operación de estos dispositivos para el enfriamiento de locales.

Es posible la combinación eficiente de medidas de eficiencia energética y el uso de fuentes alternas de energía en micro generación en sistemas distribuidos siempre que se cuente con el suficiente potencial energético en la ubicación especifica. La combinación de aplicación de medidas de eficiencia energética, principios bioclimáticos y las energías renovables pueden ser rentables financieramente aun para emprendimientos de pequeña potencia como el caso de estudio presentado.

De igual forma, las medidas de eficiencia energética aplicadas en un recinto se traducen en una reducción anual bruta de emisiones de GEI. Finalmente, el programa informático RETScreen es una formidable herramienta de simulación para el análisis de factibilidad de implementación de proyectos de eficiencia energética y de energías renovables.

6 Bibliografía

1. Ministerio de Energía y Minas de Nicaragua, MEM. (2014). Plan indicativo de la expansión de la generación de energía eléctrica 2013 -2027. Obtenido desde: http://www.mem.gob.ni/media/file/POLITICAS%20Y%20PLANIFICACION/PLAN%20INDIC.%20DE%20EXP.%20DE%20GEN.%20ELECT%202013-2027.pdf

2. Comisión Nacional de la Energía, CNE. (2005). Plan indicativo de la generación del sector eléctrico periodo 2005 – 2016. Obtenido desde: http://www.ine.gob.ni/DGE/mercado/Plan_Indicativo_2005.pdf

3. Linares, P. 2009.Eficiencia energética y medio ambiente. Información Comercial Española, ICE: Revista de economía, ISSN 0019-977X, Nº 847, 2009 (Ejemplar dedicado a: Economía y medio ambiente), págs. 75-92.

4. Rigali, S y Gonzales, J.2011. Cálculo del potencial de generación fotovoltaica dela cubierta de un edificio público empleando el software RETScreen y estimación del impacto visual que producirá la integración caso: terminal de ómnibus de Santiago del estero. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 15. Impreso en la Argentina. ISSN 0329-5184

5. Cinza, I. 2010.Eficiencia energética en el alumbrado.Eficiencia energética: tecnología y políticas de apoyo / coord. por Beatriz Yolanda Moratilla Soria, José Ignacio Linares Hurtado, Alexis Cantizano González, María del Mar Cledera Castro, 2010, ISBN 978-84-935950-5-0, págs. 121-126.Texto Completo Libro. Obtenido desde: https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=434486&orden=0&info=open_link_libro

6. García-Baquero, G. 2013.Eficiencia energética en el alumbrado. Anales de mecánica y electricidad, ISSN 0003-2506, Vol. 90, Fasc. 4, 2013 (Ejemplar dedicado a: Eficiencia energética), págs. 47-49

7. Lorente, M. 2009. Arquitectura bioclimática. Isagogé, ISSN-e 1885-2475, Nº. 6, 2009

8. Espigado, G. Diseño y eficiencia energética. Economía industrial, ISSN 0422-2784, Nº 395, 2015 (Ejemplar dedicado a: Ciudades inteligentes), págs. 37-52.

9. Fernández R. 2013.Eficiencia energética en la edificación. Una década de análisis de las tecnologías energéticas: : análisis de situación y prospectiva de nuevas tecnologías energéticas / coord. por Beatriz Yolanda Moratilla Soria, 2013, ISBN 978-84-8468-508-1, págs. 63-82.

10. Neila, J.2000. Arquitectura bioclimática en un entorno sostenible: buenas prácticas edificatorias. Cuadernos de investigación urbanística, ISSN 1886-6654, Nº. 41, 2004 (Ejemplar dedicado a: Textos sobre sostenibilidad I), págs. 89-99

11. Thumann, A y Meth , P.2008. Handbook of Energy Engineering.Fairmont Press. ISBN 0-88173-581-7.

12. Bravo D y Pérez Y. Eficiencia energética en la climatización de edificaciones. Revista Publicando, ISSN-e 1390-9304, Vol. 3, Nº. 8, 2016 (Ejemplar dedicado a: Vol. 3 No.8. 2016), págs. 218-238.

13.Wegertseder, P; Schmidt, D; Hatt, T; Saelzer, G y Hempel, R.2014. barreras y oportunidades observadas en la incorporación de estándares de alta eficienciaenergética en la vivienda social chilena. Arquitectura y Urbanismo. 2014, Vol. 35 Issue 3, p37-49. 13p. Obtenido desde: http://web.b.ebscohost.com/ehost/pdfviewer/pdfviewer?vid=5&sid=66a61ace-b643-4167-8c41-4659431e1a8e%40sessionmgr102

14. Case, M; Zhivov, A; Liesen, R y Zhivov, M. 2016.A Parametric Study of Energy Efficiency Measures Used in Deep Energy Retrofits for Two Building Types and U.S. Climate Zones. *ASHRAE Transactions.* 2016, Vol. 122 Issue 1, p44-57. 14p.

15. Villamil, M; Estupiñán, Jesús y Pedraja, R.2008. Soluciones de bajo costo para elevar la eficiencia energética en los centrales Azucareros. Centro Azúcar. ene-mar2008, Vol. 35 Issue 1, p1-5. 5p.

16. Ramírez A, I. 2010. Certificación de edificios sostenibles. Eficiencia energética: tecnología y políticas de apoyo / coord. por Beatriz Yolanda Moratilla Soria, José Ignacio Linares Hurtado, Alexis Cantizano González, María del Mar Cledera Castro, 2010, ISBN 978-84-935950-5-0, págs. 121-126.Texto Completo Libro. Obtenido desde: https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=434486&orden=0&info=open_link_libro

17. Silva, M; González, Nápoles y Ley, N.2013. Sistema de gestión total de eficiencia energética en una destilería de etanol de caña de azúcar. Centro Azúcar. ene-mar2013, Vol. 40 Issue 1, p33-40. 8p

18. González, D y Martínez, R.2014. Sistema de elementos de protección solar para los edificios en Cuba. Estudio de caso. Arquitectura y Urbanismo. 2014, Vol. 35 Issue 3, p5-17. 13p.

19. Ojembarrena, J; Chanampa, M; Rivas, P; Olivieri, F; Aragonés, R; Neila, J; Frutos, C.2013. Thermal and Illuminance Performance of a Translucent Green Wall. Jornal of Architectural Engineering. Dec2013, Vol. 19 Issue 4, p256-264. 9p. DOI: 10.1061/(ASCE)AE.1943-5568.0000059

20. Jiajun L; Claridge, D y Linyan W. Analysis of Whole-Building HVAC System Energy Efficiency. ASHRAE Transactions. 2018, Vol. 124 Issue Part 1, p72-87. 16p., Base de datos: Academic Search Premier

Características de cisco de café peletizado y desagregado como combustible

Raiza Manrique [1], Daniela Vásquez[1], Carlos Ceballos [1], Farid Chejne [1] y Andrés Amell [2]

[1] Grupo Termodinámica Aplicada y Energías Alternativas, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Cra 80 65-223, Medellín, Colombia.
[2] Grupo Ciencia y Tecnología del Gas y Uso Racional de la Energía, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Calle 67 53-108, Medellín, Colombia.

Resumen. En Colombia, el cisco de café representa una oportunidad energética equivalente a 49,106 TJ/año; sin embargo, este tipo de biomasa presenta retos relacionados con el contenido de humedad, forma irregular y baja densidad de bulto, lo cual dificulta su uso como combustible en hornos. En el presente trabajo se muestran los resultados de la determinación de los factores de potencia específica del cisco de café que permiten el dimensionamiento adecuado de cámaras de combustión de este material. Para esto se utilizó cisco de café desagregado y peletizado con 15% de humedad, y se oxidaron en un quemador horizontal a escala laboratorio. A partir de las dimensiones de la cámara y tiempo de oxidación del cisco de café se determinaron los indicadores de potencia específica; adicionalmente, se realizaron pruebas de combustión de pélet en un horno a escala piloto, el material inicial y final fue sometido a análisis último y próximo, y los gases de combustión fueron cuantificados mediante un analizador portátil y cromatografía de gases. Con los resultados obtenidos se calcularon los factores de potencia específica los cuales son I_V= 0.789 MW/m3 y I_g= 0.007 MW/m2 para el material peletizado y I_V= 0.3732 MW/m3, I_g= 0.0032 MW/m2 para el material desagregado. Con estos factores calculados se realizó el diseño de la cámara de combustión para el cisco de café peletizado, y se comparó con el diseño para cisco desagregado. Se espera que el procedimiento usado y los resultados obtenidos sirvan para el dimensionamiento de cámaras de combustión para biomasas.

Palabras clave: Cisco de café, Combustión de pélet, Potencia específica

1 Introducción

El uso de biomasa para la generación de energía térmica puede contribuir de manera positiva a una serie de objetivos políticos comunes, entre ellos: aumentar el uso de energías renovables, reducir las emisiones contaminantes y cumplir la normativa ambiental [1]; adicionalmente, puede alentar el desarrollo económico en las comunidades dependientes del sector agrícola y forestal. En este sentido, en países cuyas economías estén basadas en la agricultura, el aprovechamiento energético de la biomasa podría

ser una solución para la disposición final de este tipo de residuos y contribuir a la generación de energía a partir de tecnologías alternativas. En Colombia se producen alrededor de 72 millones de toneladas anuales de biomasa residual agrícola, de las cuales 193,460 toneladas al año corresponden a cisco de café [2] lo que representa una oportunidad energética equivalente a 49,106 TJ/año [3].

S.B. Kang et al. [4] investigaron las características de la combustión de granos de café gastados y pélet de madera, en su estudio encontraron que el potencial energético del grano de café gastado es superior a los pélet de madera debido a su mayor contenido de hidrógeno; además, los autores evaluaron la combustión en una caldera de 6.5 kWt y cuantificaron los gases de combustión, obteniendo concentraciones de O_2: 17.8%, CO: 643 ppm y NO_X: 163 ppm, estos valores indican que la combustión es incompleta; por lo que el autor concluye que es necesario optimizar el diseño de la caldera para que la combustión se realice de manera adecuada y se reduzca la generación de emisiones contaminantes.

L. Limousy et al. [5] realizaron la evaluación de la combustión de pélet de madera, pélet de café gastado y pélet de mezcla de ambas biomasas, en su estudio encontraron que la combustión de pélet de café gastado generó mayores emisiones de CO y NO_X que la mezcla de biomasa y los pélet de madera. J. C. Moran et al. [6] investigaron diferentes mezclas de pélet de biomasa y residuos municipales con el fin de obtener una buena eficiencia en la combustión y menores emisiones. En su estudio encontraron que la mezcla óptima es la que contiene 20% de residuos y 80% de biomasa con una proporción de aire en exceso de 1.6. Por otro lado, V. K. Verma et al. [7] realizaron una evaluación de las emisiones contaminantes de CO, NO_X, SO_X y C_XH_Y en una caldera de 40 kWt de la combustión de pélet de diferentes biomasas, entre las cuales se tiene la madera, manzana, césped y semillas de girasol; en su trabajo encontraron que los principales parámetros para el uso adecuado de agro-pélet en equipos de combustión a pequeña escala es el contenido de ceniza y la baja temperatura de fusión.

Adicionalmente, F. Guo y Z. Zhong [8] estudiaron la combustión de pélet compuestos de amento, residuos de madera, residuos de arroz y carbón mediante análisis termogravimétrico y en lecho fluidizado con el fin de optimizar los procesos de oxidación. Los autores encontraron que la proporción de mezcla de los pélet compuestos y carbón es de 30-70% respectivamente, debido a que la energía de activación es mínima y se reduce la cantidad de metales alcalinos que pueden generar problemas de encostramiento.

Por otro lado, en la literatura es posible encontrar algunos estudios enfocados en la determinación de la temperatura de ignición para diferentes biomasas bajo distintas tasas de calentamiento [9]–[11]. D. Magalhaes et al. [9] en su estudio encontraron que la ignición se produce en la fase gaseosa debido al contenido de material volátil, el material volátil de baja densidad provoca la ignición sin importar la tasa de calentamiento que se utilice. También se resalta el trabajo de Juan Riaza et al. [10] ya que analizaron diferentes factores para la determinación de la temperatura de ignición de biomasa en forma de pélet. En su estudio tuvieron en cuenta la tasa de calentamiento y otros parámetros como tamaños de partícula, temperatura de operación y concentraciones de oxígeno, encontrando que las biomasas presentaron una mayor susceptibilidad de autoignición en comparación con los carbones de lignito.

Así mismo, se han realizado estudios para la determinación de la temperatura de ignición con mezclas de carbón y biomasa con el fin de aprovechar los residuos mediante la co-combustión, lograr una reducción de la temperatura de ignición en el material y evitar la generación de NO_X [10], [12]–[14], las investigaciones utilizan principalmente métodos geométricos a partir de las gráficas TGA y DTG. Otros estudios relacionados con biomasas como: bagazo de caña, bambú, pino, olivo, cáscara de flores, cáscara de almendra y residuos de aceituna [9], [11], [15], determinan las temperaturas de ignición para estas biomasas, encontrándose valores entre 290 – 320 °C. Sin embargo, en esos estudios no se analizaron las diferencias en la reactividad de los materiales y sus implicaciones técnicas para el diseño de cámaras de combustión.

En resumen, en la literatura revisada no se encuentran trabajos reportados sobre el desarrollo de equipos de combustión de biomasa peletizada, por lo tanto, en este trabajo se estudiará la combustión de cisco de café, se analizarán las principales diferencias entre la combustión del material agregado y desagregado y, se determina la potencia específica que servirá como parámetro de diseño en cámaras de combustión.

2 Metodología

Se determinaron algunas propiedades termoquímicas del cisco de café como la temperatura de llama adiabática y temperatura de ignición, la temperatura de llama adiábatica se determinó mediante un balance de energía en la cámara de combustión bajo condiciones estequiométricas y con exceso de aire. Se tomaron muestras del cisco de café para someter el material a análisis elemental y análisis próximo en un EXETER Brand modelo CE-440 utilizando la norma ASTM D5373 y en una TGA Linseis Brand modelo STA PT-1600.

La temperatura de ignición se determinó por medio de análisis termogravimétrico en una TGA Linseis Brand modelo STA PT-1600, el análisis termogravimétrico se realizó con muestras de 13 ± 0,01 mg a una velocidad de calentamiento de 10 °C/min en una atmósfera N_2/O_2 mezclada (50/13 ml/min), la temperatura de ignición se determinó a partir de la curva de pérdida de masa, trazando tres segmentos en los cambios más significativo y se contrasta con la curva de la derivada de pérdida de masa.

El estudio de la combustión de pélet se realizó mediante pruebas experimentales en un horno horizontal a escala laboratorio (ver Fig. 1), el equipo tiene 30 cm de longitud, el interior está rodeado de resistencias eléctricas que permiten el calentamiento de un tubo de cuarzo de 3.5 cm de diámetro y 64 cm de longitud, donde se aloja el material a estudiar. La muestra se pesa antes y después de la prueba y se soporta sobre un portamuestra de cuarzo con dimensiones de 2.4 cm de diámetro y 13 cm de longitud. El flujo de aire utilizado se determinó mediante pruebas preliminares asegurando que el flujo fijado superará las pérdidas de fricción en la línea y en las trampas utilizadas sin arrastrar la muestra de material, el flujo de aire comprimido se fijó en 1.7 lpm que proviene de un tanque pulmón conectado a un compresor tipo pistón.

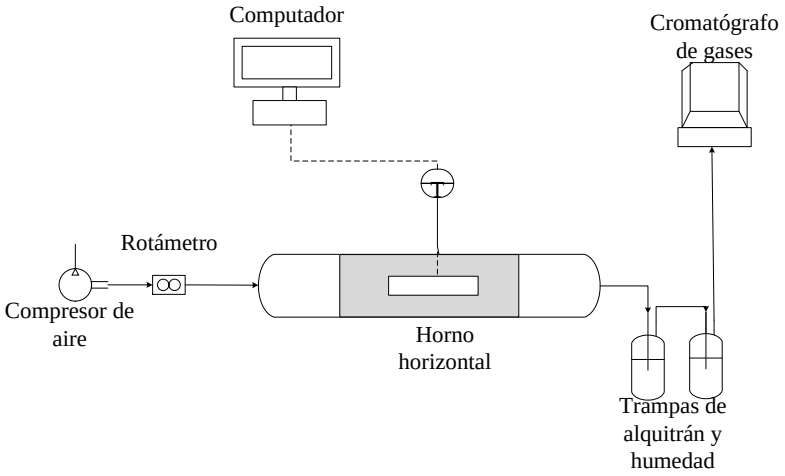


Fig. 1. Montaje experimental para el estudio de combustión de pélet.

La temperatura de proceso fue 700°C medida en la superficie de las resistencias eléctricas y se utilizó un termopar para el seguimiento de la temperatura en el pélet, el portamuestra con el cisco de café se ingresó al reactor cuando el horno registraba la temperatura de proceso; posteriormente, se verificaba el contacto del termopar con el material, se sellaba el tubo de cuarzo y se abría la válvula del rotámetro para crear la atmósfera oxidante. Los gases generados a partir de la combustión se hacían pasar por un sistema de trampas para retener primero el alquitrán mediante contacto directo con alcohol isopropílico y luego retirar humedad mediante contacto directo con gel de sílica; posteriormente, se recolectaron en bolsas Tedlar y se analizaron en un cromatógrafo de gases Agilent MicroGC modelo 3,000 para cuantificar los compuestos: O_2, H_2, CH_4, CO, CO_2, H_2S.

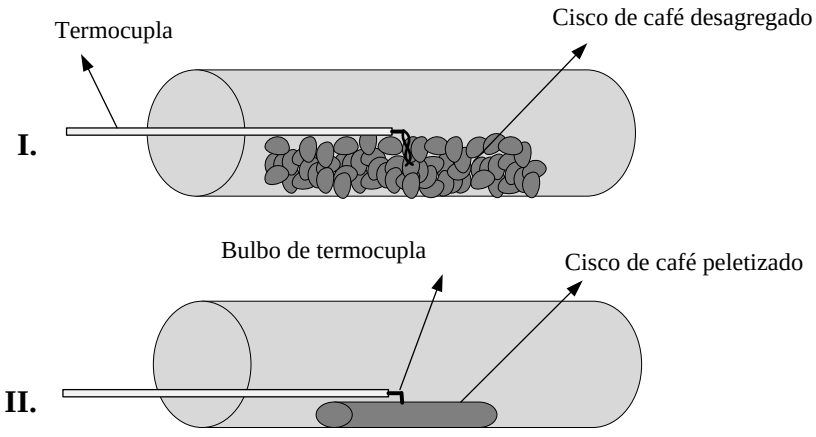


Fig. 2. Montaje de la termocupla en la biomasa I. material desagregado, II. material peletizado.

Para realizar la medición de la temperatura en el pélet, se realizó una perforación al material aglomerado con un taladro utilizando una broca de 1 mm, donde se introduce la punta de la termocupla, en la Fig. 2, se puede observar la posición de la termocupla sobre el material, I. en el caso del material desagregado y en la imagen II. el material peletizado. Las pruebas se realizaron con 1.8 g de material desagregado y aglomerado de cisco de café, con el fin de analizar el proceso de oxidación.

La velocidad de energía que puede liberar el combustible se determinó a partir del cálculo de las ecuaciones 1 y 2, que relaciona esta energía por unidad de volumen y área en la cámara de combustión.

$$I_v = \frac{m}{t_r V} * PCI \quad (1)$$

$$I_g = \frac{m}{t_r A} * PCI \quad (2)$$

Donde I_V es un factor empírico que relaciona la velocidad de energía que puede liberar el combustible por unidad de volumen de cámara de combustión, V es el volumen de la cámara de combustión, m es la cantidad de material utilizado, PCI es el poder calorífico inferior del combustible e I_g es un factor empírico que relaciona la velocidad de la energía que puede liberar por unidad de área de la parrilla y A es el área de la parrilla. Estos factores se calculan de acuerdo con los resultados experimentales de las pruebas de combustión en el horno horizontal.

El tiempo de oxidación del material desagregado y peletizado se determinó a partir de la composición de oxígeno y dióxido de carbono en los gases de combustión; es decir, cuando el porcentaje de oxígeno a la salida fuera igual a su concentración en el aire y cuando la concentración de dióxido de carbono fuera cero.

Adicionalmente, se calculó la velocidad de energía que puede liberar el combustible por unidad de volumen en la cámara de combustión a partir del volumen y área proyectada del material en el horno y se comparó con los valores generales reportados en la literatura [16]–[18].

Finalmente, se realizaron pruebas a escala piloto para analizar las emisiones contaminantes generadas durante la combustión con el material aglomerado y desagregado, se realizaron 4 experimentos con 1.2 kg/h de material peletizado y 1.6 kg/h de material desagregado garantizando un flujo de 200 lpm de comburente, de acuerdo al sistema de alimentación del reactor, en la Fig. 3 se puede observar el montaje experimental.

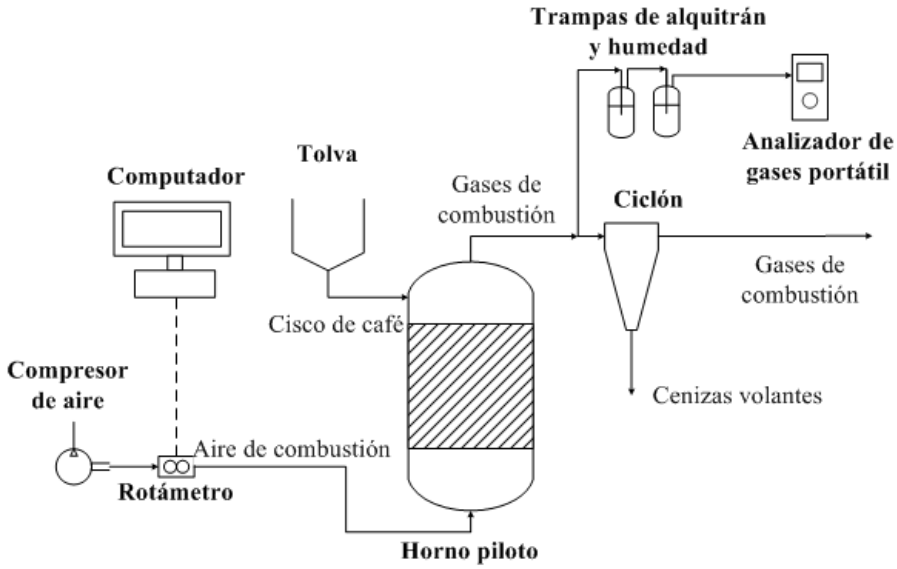


Fig. 3. Montaje experimental pruebas en horno piloto.

El flujo de comburente es aire comprimido proveniente de un tanque pulmón, para el control del flujo en el reactor se utilizó un flujómetro digital marca OMEGA referencia FMA5400/5,500, en estas pruebas se recolectaron muestras de gases de combustión para determinar la composición de O_2, H_2, CH_4, CO, CO_2, H_2S por medio del cromatógrafo de gases mencionado y para determinar la concentración de NO_x y SO_2 se utilizó un analizador de gases portátil marca Bacharach.

3 Resultados

La temperatura de llama adiabática se determinó por medio de un balance de energía considerando la variación de la capacidad calorífica respecto a la temperatura para los gases de combustión, se determinaron los resultados de temperatura de llama a condiciones estequiométricas y con un exceso de aire del 40 %, el cual es un valor recomendado en la literatura para combustibles sólidos [18], [19]. En condiciones estequiométricas la temperatura de llama es 1,827 K (1,624 °C) y bajo condiciones de exceso la temperatura es 1,400 K (1,127 °C). Entre mayor sea el porcentaje de exceso de aire, el volumen de gases de combustión aumentará y, por lo tanto, la temperatura de llama disminuirá. En la Tabla 1 se presenta el análisis próximo y elemental del cisco de café.

Tabla 1. Análisis próximo y elemental de cisco de café.

Análisis próximo	
Humedad total (% peso)	8.88
Material volátil (% peso)	75.85
Cenizas (% peso)	0.79
Carbono fijo (% peso)	14.48
PCI (kJ/kg)	15,868
PCS (kJ/kg)	17,259
Análisis elemental	
Carbono (% peso)	49.33
Hidrógeno (% peso)	5.86
Nitrógeno (% peso)	0.66
Azufre (% peso)	0.04
Oxígeno (% peso)	43.24

Por otro lado, se determinó la temperatura de ignición del material por medio de análisis grafico a partir del análisis termogravimétrico de la muestra, siguiendo la metodología de X. G. Li *et al.* [12], para las pruebas en la TGA se definió una tasa de calentamiento de 10 K/min según lo reportado en la literatura [12], [15], [20]. El método gráfico consiste en trazar una recta vertical sobre el punto de máxima velocidad de pérdida de masa (punto P), luego se traza una recta tangente a la intersección de la curva de pérdida de masa (--- TGA en la Fig. 4) y la recta sobre el punto de máxima velocidad de pérdida de masa (punto Q), posteriormente se traza otra recta tangente sobre la primera etapa (de secado) en la curva TGA; por último sobre el punto de intersección entre las líneas tangentes (punto R) se traza una línea vertical y se identifica el valor de la temperatura de ignición del material en el eje axial (ver Fig. 4). Con base en esta metodología, se determinó que la temperatura de ignición del cisco de café es 280 °C, valor que se encuentra entre los rangos de temperatura de ignición reportados en la literatura para diferentes biomasas [9], [11], [15].

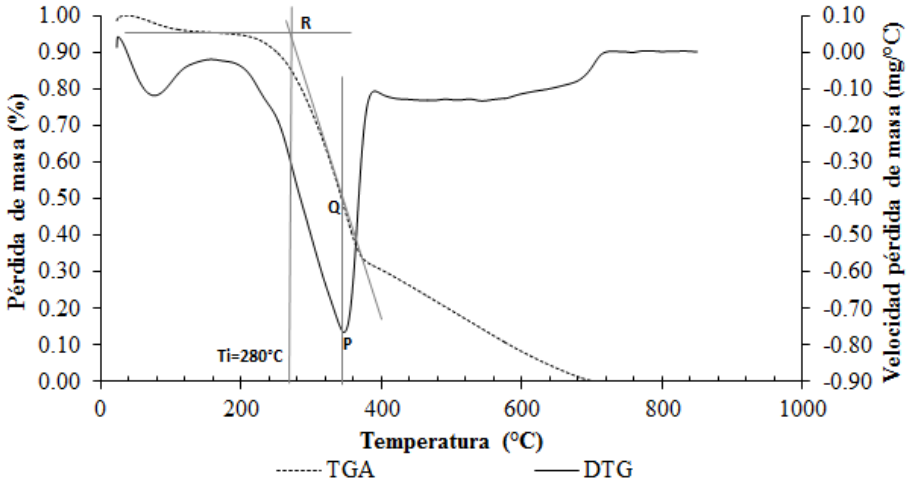


Fig. 4. Temperatura de ignición del cisco de café.

Una vez determinada la temperatura de ignición, se realizaron pruebas de combustión en horno horizontal, que permitieron estudiar los efectos de la peletización sobre el proceso de combustión, analizado a partir de la tasa de calentamiento y composición de gases. Los resultados de las pruebas de combustión realizados en el horno horizontal se presentan en la Fig. 5, en esta se puede evidenciar las etapas de pirólisis y combustión del char.

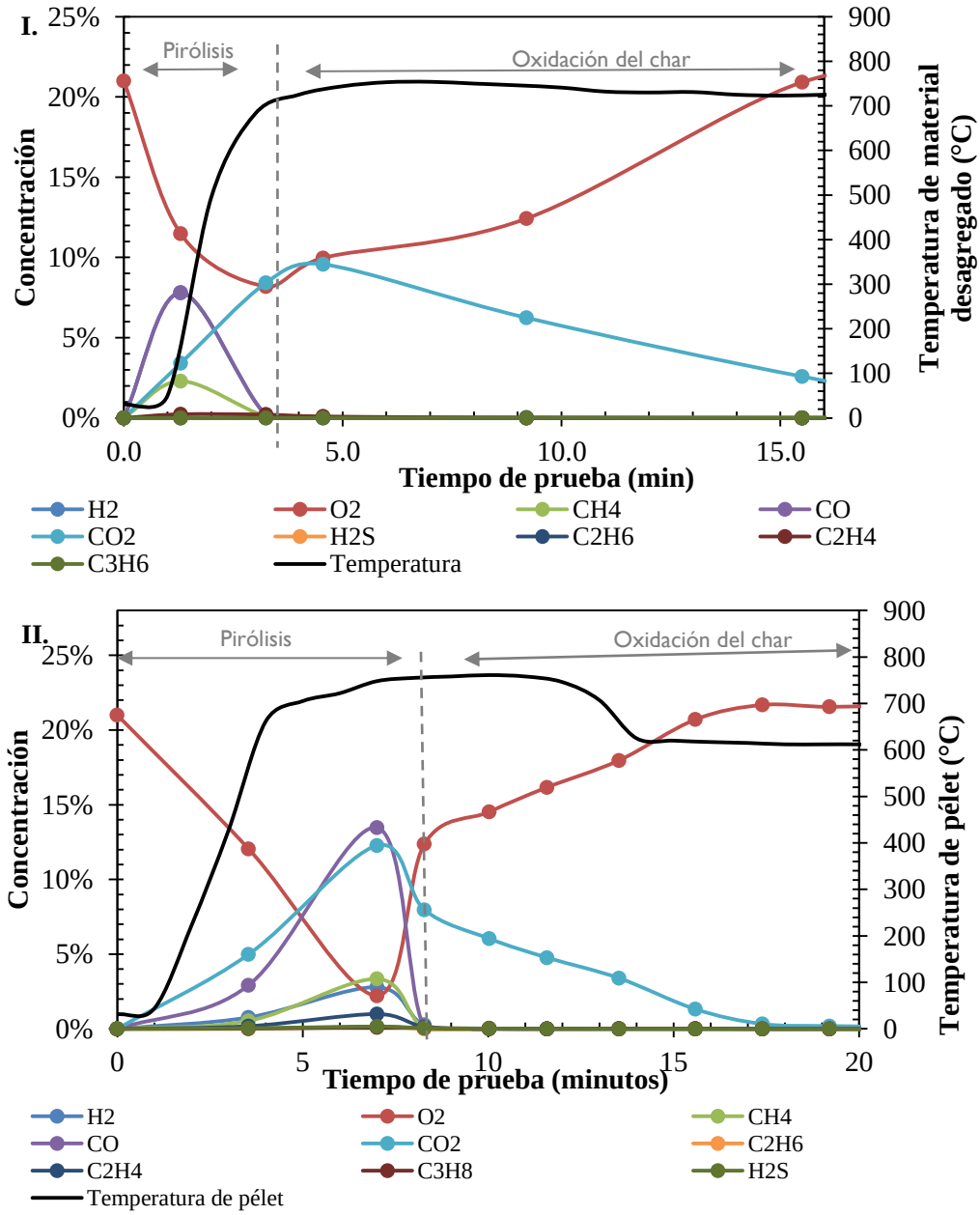


Fig. 5. Pruebas de combustión I. material desagregado, II. material peletizado.

A partir de la Fig. 5 se puede observar las etapas de pirólisis y oxidación del char para el cisco de café desagregado y aglomerado, la etapa de secado es la primera del proceso de combustión de biomasa; sin embargo, en los experimentos realizados no se logra evidenciar esta etapa de secado debido al bajo contenido de humedad (~9.5 %) y

a que los experimentos se realizaron insertando el portamuestra con el horno a 700°C, lo cual genera una alta velocidad de secado que ocasiona que el agua se evapore y sea forzada a salir de la partícula antes de la desvolatilización.

Cuando el secado de la partícula es completado, la temperatura aumenta y el sólido comienza a descomponerse liberando volátiles, el flujo de volátiles hacia el exterior de la partícula no permite que el oxígeno suministrado en el proceso ingrese a los poros y por eso durante la desvolatilización se produce la etapa de pirólisis. Las especies H_2, CO_2, H_2S, O_2, C_2H_6, CH_4, C_2H_4, CO y C_3H_8 se lograron cuantificar mediante el uso del cromatógrafo de gases, estas especies se registran en la etapa de desvolatilización del material cuando la concentración de oxígeno disminuye, posteriormente se evidencia la combustión del char donde el monóxido de carbono disponible reacciona en la superficie con el oxígeno del medio generando dióxido de carbono.

En el caso del material desagregado la pirólisis tiene una duración de 3 minutos y el material aglomerado reporta un tiempo en el proceso de pirólisis de 7 minutos, este comportamiento se produce debido a que el material peletizado tiene láminas de cisco de café unidas entre sí mediante mecanismos de enclavamiento mecánico que permiten que el material se oxide lentamente; por el contrario el material desagregado tiene más espacios entre láminas de cisco de café lo que permite que las reacciones se produzcan en menor tiempo. Al final del proceso de desvolatilización, el char y la ceniza comienzan a aparecer en la muestra, el char es altamente poroso debido a los espacios que generan los volátiles al escapar del char en el proceso previo, debido a la porosidad generada el aire se puede difundir en el char e ingresar al interior de las partículas [19]. Respecto al tiempo de oxidación, en el material desagregado fue de 16 minutos y en el caso del material aglomerado el tiempo fue de 21 minutos.

Adicionalmente, a partir de la Fig. 6 se puede observar que la temperatura del material también se registró durante las pruebas de combustión del cisco de café, la máxima temperatura registrada durante el proceso de combustión fue de 751 °C para el material original y 761°C para el pélet. Estos valores son superiores a la temperatura fijada en el horno como consecuencia de las reacciones exotérmicas que caracterizan la oxidación de un material orgánico.

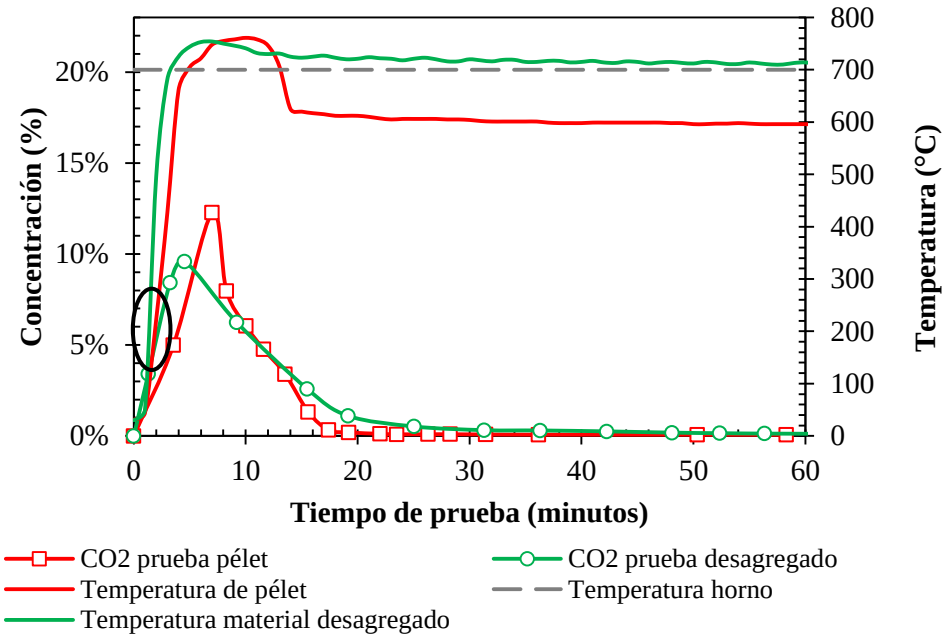


Fig. 6. Temperatura del material y concentración de CO_2 registrado.

A partir de la Fig. 6 se logra evidenciar que la temperatura de los materiales durante las pruebas realizadas presentan diferencias en la tasa de calentamiento a partir de una temperatura de 280 °C (zona resaltada), esta particularidad puede ser debido a que la temperatura de ignición del cisco de café se encuentra en este valor. Al superar esta temperatura el material desagregado tiene una mayor velocidad de oxidación, produciendo dióxido de carbono a una mayor tasa respecto al material peletizado, debido a la distribución del material desagregado, tal como se observa en la curva de concentración de dióxido de carbono de la Fig. 6.

También se puede observar en la Fig. 6 que una vez finalizado el proceso de combustión, el cual se identifica porque la participación de CO_2 en los gases se reduce a valores cercanos a cero, que la temperatura del material desagregado se mantiene a la temperatura del horno, dado que la termocupla queda descubierta, por lo tanto, se registra con ella exactamente la temperatura del horno. Entre tanto, la temperatura registrada para el material peletizado, es inferior a la temperatura del horno después de finalizado el proceso de oxidación, debido a que la termocupla insertada dentro del pélet registra la temperatura de su interior que como consecuencia, puede estar relacionado con el desarrollo de reacciones secundarias endotérmicas después de finalizado el proceso y debido también a la transferencia de calor del pélet hacia el aire frío que entra al horno robándole energía.

Para el cálculo de la energía que puede liberar el material por unidad de volumen y área, se determinan los tiempos de oxidación de las pruebas experimentales y el volumen y área proyectada por el material en el horno horizontal antes de ingresar las muestras al horno a partir de esta información, se calcula el I_V e I_g con las ecuaciones

1 y 2, los resultados se presentan en la Tabla 2. La energía del material se calculó con el poder calorífico inferior (15.8 MJ/kg), se resalta que este valor no depende de la forma como se encuentre organizado el material.

Tabla 2. Valores de la energía liberada por unidad de área y de volumen de cámara.

Parámetro	Cisco desagregado	Cisco aglomerado
Energía (MW)	2.87 e -5	2.27 e -5
Volumen cámara (m^3)	0.0000769	0.0000288
Área cámara (m^2)	0.0087	0.00329
I_V (MW/m^3)	0.3732	0.7895
I_g (MW/m^2)	0.0032	0.0069

La potencia específica corresponde a 0.3732 MW/m^3 de cámara para el material desagregado y 0.7895 MW/m^3 de cámara para el material aglomerado, estos valores permiten estimar que en el caso del cisco de café peletizado podría liberar más energía en un volumen fijo que el material desagregado. Para una potencia requerida, en el momento de diseñar un equipo de combustión, se puede decir que la cámara de combustión adecuada para quemar cisco de café en forma desagregada es 2.1 veces mayor que para la oxidación de los pélet. Adicionalmente, la densidad de bulto de material peletizado (614 kg/m^3) es tres veces mayor que el material desagregado (213 kg/m^3), se puede decir que el volumen ocupado por el combustible aglomerado es casi la tercera parte que para el material desagregado, se puede inferir que los equipos que operan con pélet de cisco de café son más pequeños y compactos.

Respecto a la energía liberada por unidad de área de parrilla, se puede afirmar que la densidad energética para la combustión de pélet en parrilla fija es tres veces mayor que cuando se utiliza el material desagregado. Lo cual significa que en el momento de diseñar equipos de combustión con materiales peletizados se pueden construir áreas de parrilla tres veces menor. Con el ánimo de comparar estos índices energéticos medidos por primera vez para el caso del cisco de café con los reportados por otros autores para otros combustibles sólidos, es posible concluir que la densidad energética para el cisco de café se ubica por debajo del rango de 0.47-9 MW/m^3 para combustibles sólidos [16], [18] y con respecto a la potencia específica por unidad de área de parrilla calculados en este trabajo, también se ubica por debajo del rango 0.74-1.7 MW/m^2 para carbón bituminoso en parrilla fija reportado por los autores [16], [18].
Las diferencias determinadas en este trabajo con respecto a los valores reportados por otros autores para el caso del carbón [16], [18] se deben principalmente a los valores de las propiedades térmicas de ambos tipos de combustible, tales como poder calorífico y densidad, lo cual hace que el desempeño energético sea superior para combustibles fósiles como en el caso del carbón. Estas diferencias también se pueden atribuir a las diferentes etapas que ocurren en la combustión, teniendo en cuenta que en la primera etapa ocurre la desvolatilización y posteriormente, ocurre la combustión del char. Esto puede explicar diferentes valores de la velocidad de reacción dependiendo de la etapa del proceso, lo cual hace que se tengan reactividades diferenciadas según la etapa, es posible que en la etapa de desvolatilizacion las biomasas sean más reacti-

vas que los carbones, por la fácil oxidación de sus compuestos gaseosos liberados durante esta etapa que aportan energía para la combustión del char.

Por otro lado, se realizaron pruebas de combustión a escala piloto con cisco de café, las cantidades de comburente y combustible se determinaron a partir de la capacidad del sistema de alimentación, para una hora de prueba se alimentó 1.2 kg de cisco de café suelto y 1.6 kg de cisco de café aglomerado, en la Fig. 7 se pueden observar los resultados del seguimiento de gases en las pruebas piloto realizadas al cisco de café desagregado y aglomerado.

En las pruebas realizadas, el reactivo límite fue el cisco de café, por lo tanto, en la Fig. 7 se observa que la concentración aumenta mientras se inicia la alimentación de la biomasa y posteriormente disminuye cuando el material se consume. La concentración de óxidos de azufre es baja en el proceso (alrededor de 40 ppm) debido a que el contenido de azufre en el cisco de café es muy bajo (0.05%), la concentración de SO_2 puede generarse por la descomposición de $CaSO_4$ en dióxido de azufre a altas temperaturas (> 1,200°C) [21], [22]; sin embargo, en las pruebas se garantizó la temperatura del equipo por debajo de 1,200 °C.

Las emisiones de óxido de nitrógeno se encuentran alrededor de 180 ppm durante la combustión del material a escala piloto, la formación de NO se debe principalmente a la oxidación del nitrógeno a temperaturas por debajo de 1,000°C, el NO es generado por reacciones homogéneas y heterogéneas [8], [23]; el NO registrado durante las pruebas es producto de la temperatura en el equipo, debido a que la concentración del nitrógeno en la biomasa es de 0.04 %.

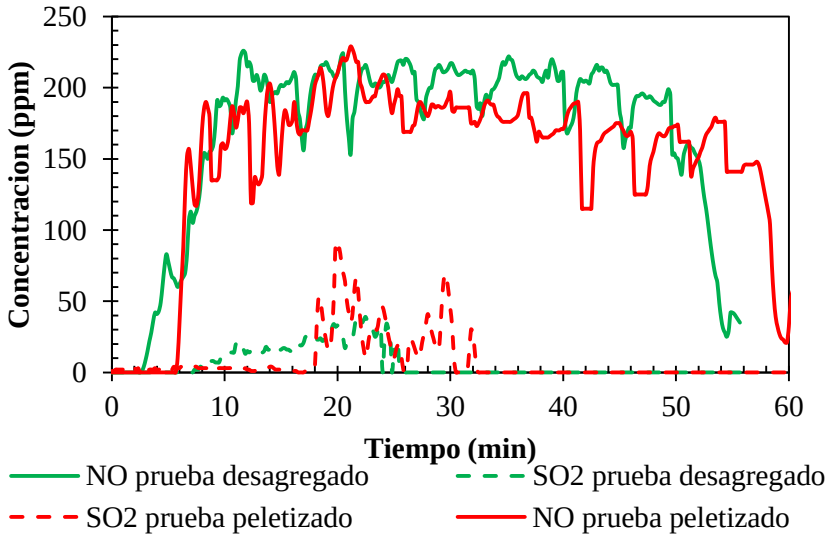


Fig. 7. Emisiones contaminantes durante el proceso de combustión en pruebas piloto.

4 Conclusiones

Con base en las pruebas experimentales de combustión se determinó que la temperatura de llama del cisco de café corresponde a 1,624 °C, la temperatura de ignición es de 280 °C, valor que se encuentra entre las temperaturas de ignición de biomasas reportadas en la literatura. Se identificó que el material en su forma peletizada aumenta el tiempo de oxidación en comparación con el material desagregado debido a la falta de área disponible para el cisco de café en su forma aglomerada, el cisco de café peletizado tarda 20.8 minutos en promedio para oxidar la materia orgánica, valor mucho mayor al cisco desagregado que tarda 16.5 minutos en promedio.

Se hallaron por primera vez los parámetros de diseño que se aplican al cisco de café tanto en su forma desegregada como peletizada; los cuales permitirán hacer diseños de futuros equipos. Los parámetros de energía liberada por unidad de volumen y área se calcularon experimentalmente para el cisco de café (I_V= 0.3732 MW/m^3, I_g= 0.0032 MW/m^2 para el material desagregado e I_V= 0.7895 MW/m^3, I_g= 0.0069 MW/m^2 para el material peletizado), estos valores pueden facilitar el dimensionamiento de la cámara de combustión.

Referente a las emisiones de NO y SO_2 están relacionadas con las temperaturas de operación del equipo utilizado, altas temperaturas contribuyen a la generación de SO_2 y bajas temperaturas ayudan a la generación de NO. Además, se identificó que la combustión del material en su forma desagregada requiere un volumen de cámara de combustión y área de parrillas 2.1 veces mayor que lo que requerirá la combustión del cisco de café peletizado para un adecuado rendimiento del proceso.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Fondo Nacional de Financiamiento para la Ciencia, la Tecnología y la Innovación FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS de Colciencias, la financiación del programa de Investigación en Combustión Avanzada de Uso Industrial Fase II – INCOMBUSTION Fase II, del cual hace parte el proyecto “Diseño de un Secador Híbrido de Biomasa”.

Referencias

[1] Energy Mining Planning Unit, “Plan Energetico Nacional Colombia: Ideario Energético 2050,” *Unidad Planeación Min. Energética, Repub. Colomb.*, p. 184, 2015.
[2] Departamento Administrativo Nacional de Estadistica (DANE), “Tercer censo nacional agropecuario,” 2014.
[3] Cenicafe, “Los subproductos del café: fuente de energía renovable,” 2010.
[4] S. B. Kang, H. Y. Oh, J. J. Kim, and K. S. Choi, “Characteristics of spent

coffee ground as a fuel and combustion test in a small boiler (6.5 kW)," *Renew. Energy*, vol. 113, pp. 1208–1214, 2017.

[5] L. Limousy, M. Jeguirim, P. Dutournié, N. Kraiem, M. Lajili, and R. Said, "Gaseous products and particulate matter emissions of biomass residential boiler fired with spent coffee grounds pellets," *Fuel*, vol. 107, pp. 323–329, 2013.

[6] J. C. Moran, J. L. Miguez, J. Porteiro, D. Patiño, E. Granada, and J. Collazo, "Study of the feasibility of mixing Refuse Derived Fuels with wood pellets through the grey and Fuzzy theory," *Renew. Energy*, vol. 34, no. 12, pp. 2607–2612, 2009.

[7] V. K. Verma, S. Bram, G. Gauthier, and J. De Ruyck, "Evaluation of the performance of a multi-fuel domestic boiler with respect to the existing European standard and quality labels: Part-1," *Biomass and Bioenergy*, vol. 35, no. 1, pp. 80–89, 2011.

[8] F. Guo and Z. Zhong, "Co-combustion of anthracite coal and wood pellets: Thermodynamic analysis, combustion efficiency, pollutant emissions and ash slagging," *Environ. Pollut.*, vol. 239, pp. 21–29, 2018.

[9] D. Magalhães, F. Kazanç, A. Ferreira, M. Rabaçal, and M. Costa, "Ignition behavior of Turkish biomass and lignite fuels at low and high heating rates," *Fuel*, vol. 207, no. x, pp. 154–164, 2017.

[10] J. Riaza, M. Ajmi, J. Gibbins, and H. Chalmers, "Ignition and Combustion of Single Particles of Coal and Biomass under O2/CO2 Atmospheres," *Energy Procedia*, vol. 114, no. November 2016, pp. 6067–6073, 2017.

[11] J. J. Lu and W. H. Chen, "Investigation on the ignition and burnout temperatures of bamboo and sugarcane bagasse by thermogravimetric analysis," *Appl. Energy*, vol. 160, pp. 49–57, 2015.

[12] X. G. Li, B. G. Ma, L. Xu, Z. W. Hu, and X. G. Wang, "Thermogravimetric analysis of the co-combustion of the blends with high ash coal and waste tyres," *Thermochim. Acta*, vol. 441, no. 1, pp. 79–83, 2006.

[13] C. F. Valdés, F. Chejne, G. P. Marrugo, C. A. Gómez, A. Marin-Jaramillo, and L. Norena-Marin, "Energy evaluation of pelletized mixtures of IWTP sludge and coal-fired boiler ashes by co-combustion: Identification of synergistic effects," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 124, pp. 191–201, 2017.

[14] J. García-Torrent, A. Ramírez-Gómez, E. Querol-Aragón, C. Grima-Olmedo, and L. Medic-Pejic, "Determination of the risk of self-ignition of coals and biomass materials," *J. Hazard. Mater.*, vol. 213–214, pp. 230–235, 2012.

[15] J. M. Jones, A. Saddawi, B. Dooley, E. J. S. Mitchell, J. Werner, D. J. Waldron, S. Weatherstone, and A. Williams, "Low temperature ignition of biomass," *Fuel Process. Technol.*, vol. 134, pp. 372–377, 2015.

[16] U. D. P. M.-E. UPME, "Curso virtual de Uso Racional de la Energía," 2010. [Online]. Available: http://www.si3ea.gov.co/Eure/3/inicio.html.

[17] P. Basu, C. Kefa, and L. Jestin, *Boilers and Burners Design and Theory*. New York, 2000.

[18] M. M. Martínez, *Combustión y quemadores*. Barcelona, 1989.

[19] G. L. Borman and K. W. Ragland, *Combustion engineering*. 1998.

[20] W. Cao, J. Li, and L. Lue, "Study on the ignition behavior and kinetics of combustion of biomass," *Energy Procedia*, vol. 142, pp. 136–141, 2017.
[21] F. Guo and Z. Zhong, "Co-combustion of anthracite coal and wood pellets: Thermodynamic analysis, combustion efficiency, pollutant emissions and ash slagging," *Environ. Pollut.*, vol. 239, pp. 21–29, 2018.
[22] S. Zhang, X. Jiang, G. Lv, B. Liu, Y. Jin, and J. Yan, "SO2, NOx, HF, HCl and PCDD/Fs emissions during Co-combustion of bituminous coal and pickling sludge in a drop tube furnace," *Fuel*, vol. 186, pp. 91–99, 2016.
[23] S. Zhang, X. Jiang, G. Lv, B. Liu, Y. Jin, and J. Yan, "SO2, NOx, HF, HCl and PCDD/Fs emissions during Co-combustion of bituminous coal and pickling sludge in a drop tube furnace," *Fuel*, vol. 186, pp. 91–99, 2016.

Regeneración urbana para la transformación de las ciudades en entornos más inteligentes y sostenibles: Casos de éxito en el área metropolitana de Valladolid.

Fredy Vélez[1] [0000-0003-0764-1321], Miguel García[1], Estefania Vallejo[1], Cecilia Sanz[1], Cristina de Torre[1]

[1] CARTIF Centro Tecnológico. Boecillo, Valladolid, Spain.
frevel@cartif.es

Abstract. Dentro de los planes de acción de las ciudades se presta especial atención a la mejora de su sostenibilidad a través de la rehabilitación holística y con criterios de eficiencia e implicación ciudadana. En esa línea, los proyectos R2CITIES, CITyFiED y REMOURBAN, trabajan en la rehabilitación de diversos distritos residenciales en 7 ciudades de 5 países europeos. Una de esas ciudades es Valladolid, España, en donde cada uno de esos proyectos ha actuado sobre un distrito residencial específico: Cuatro de Marzo, Torrelago (Laguna de Duero) y Fasa-Delicias, respectivamente. El presente artículo presenta una breve descripción de los distritos objetos de rehabilitar, las medidas implementadas (tanto en la parte activa como pasiva de los edificios), así como su identidad y relación con la trama urbana a la que pertenecen (movilidad, TICs, participación ciudadana, etc.), resultados esperados, experiencias y conclusiones que sirvan de base para su replicación en otros entornos urbanos.

Keywords: sostenibilidad, eficiencia energética, rehabilitación de distritos, Smart City, regeneración urbana, energía, movilidad, TICs.

1 Introducción

En la actualidad, el 51% de la población mundial vive en zonas urbanas y es responsable del consumo del 80% de los recursos [1] y según los últimos informes de la ONU, en 2050 las ciudades concentrarán hasta el 70% de la población mundial. También los estudios consideran que el 60% de la población mundial vivirá en macrociudades con decenas de millones de habitantes.

Este hecho hace que en las siguientes décadas los núcleos urbanos tengan que afrontar un número creciente de problemas ligados al abastecimiento energético, provisión de materias primas, contaminación, tráfico y dificultad en la prestación de servicios sanitarios, entre otros. Estos retos necesitan de actuaciones intensivas que permita el crecimiento sostenible de las ciudades, así como su transformación en espacios inteligentes al servicio del ciudadano.

América Latina y el Caribe (ALC) es la región en desarrollo con la más alta tasa de urbanización del mundo. Su población urbana ha pasado de ser el 41% en 1950, al

80% en 2010. Su actividad económica se concentra en sus centros urbanos (60% - 70% del PIB regional). Sin embargo, a pesar de su capacidad en la generación de riqueza, casi el 70% de las personas que viven en estas ciudades lo hacen en condiciones de pobreza. Si a lo anterior sumamos el impacto de las ciudades sobre el medio ambiente y la alta vulnerabilidad de sus urbes al cambio climático, a los desastres naturales y a las limitaciones financieras, estamos obligados a reflexionar sobre la sostenibilidad en su desarrollo urbano [2].

La teoría del desarrollo tradicional postula que la industrialización conduce a una brecha entre la productividad laboral urbana y la rural, reflejando a su vez una diferencia salarial entre las dos áreas y promoviendo con ello la migración rural-urbana. Simultáneamente, esta teoría justifica mejores indicadores de bienestar para los residentes en centros urbanos en comparación con los habitantes de las zonas rurales, pues disfrutan de una mayor cobertura en servicios públicos e ingresos más altos. Sin embargo, esta teoría no se refleja en el patrón de desarrollo de los países de ALC ni explica por qué presentan niveles de urbanización sustancialmente mayores que otras regiones del mundo. El crecimiento de la población urbana en ALC tampoco ha redundado necesariamente en mejores condiciones de vida para sus habitantes [2].

De este desafío nace el concepto de “ciudad inteligente” o Smart City. En el Centro Tecnológico CARTIF, se interpreta como un nuevo modelo de ciudad fundamentado en tres conceptos básicos: calidad de vida, sostenibilidad e innovación que implica, en algunos casos, el empleo de tecnologías de la información y las comunicaciones (TICs) pero, principalmente, la definición de modelos territoriales sostenibles y cohesionados con objetivos medioambientales, sociales, económicos, territoriales y administrativos. Como resultado, se obtienen ciudades más inteligentes y eficientes en el uso de recursos, reduciendo costes y ahorrando energía, mejorando los servicios proporcionados y la calidad de vida, y reduciendo la huella medioambiental. El fin último de estas ciudades inteligentes no es, ni mucho menos, presumir de sus avanzados sistemas e innovaciones, sino mejorar la calidad de vida de los que viven en ellas y, en un futuro, anticiparse a sus necesidades y solventar los problemas que acarree cada imprevisto que pueda surgir.

En este sentido, CARTIF lleva años trabajando para ayudar a transformar “ciudades tradicionales” en “ciudades inteligentes y sostenibles” en Europa y, más recientemente, apuesta por hacerlo también en ALC.

En línea con todo lo anterior, este trabajo presenta casos de éxito correspondientes a los resultados de los proyectos europeos (R2CITIES, CITyFiED y REMOURBAN) en Valladolid y su alfoz (España), los cuales han sido propuestos, desarrollados y coordinados por CARTIF, donde se ha buscado una regeneración urbana eficiente e integral en 7 ciudades de 5 países Europeos.

Este tipo de proyectos europeos se desarrollan dentro de un marco de trabajo colaborativo y, por tanto, cada proyecto actúa en diferentes ciudades (teniendo en cuenta sus diferencias y características comunes). Así es como R2CITIES se despliega en Kartal (Turquía) y Génova (Italia); CITyFiED en Soma (Turquía) y Lund (Suecia) y; REMOURBAN en Nottingham (Reino Unido) y Tepebasi / Eskisehir (Turquía). Valladolid es la única provincia en donde cada uno de los proyectos mencionados anteriormente ha actuado sobre un distrito residencial específico: Cuatro de Marzo

(R2CITIES), Torrelago-Laguna de Duero (CITyFiED) y Fasa-Delicias (REMOURBAN).

Todas estas ciudades trabajan intensamente para alcanzar objetivos sociales, económicos y ambientales que emanan de sus propias prioridades, integrando para ello soluciones tecnológicas innovadoras en los diversos escenarios urbanos, con amplia participación ciudadana, creando las bases de un ecosistema de negocios que facilite el despliegue de proyectos piloto y su posterior escalado y expansión. Este trabajo hace mención especial a Valladolid dado a que es la provincia en la cual convergen los 3 proyectos previamente mencionados. Esa condición se justifica debido a las características de los barrios residenciales de la ciudad y su alfoz, que vienen de tiempo atrás y que son un buen reflejo de la evolución en el crecimiento de muchos otros desarrollos urbanos.

2 Casos de éxito en el área metropolitana de Valladolid.

En la década de los 60, y debido al movimiento migratorio de los núcleos rurales a las poblaciones urbanas como consecuencia del proceso tardío de industrialización, Valladolid sufrió un incremento de población del 55,0%, el mayor de su historia. En la siguiente década aumenta en otro 36,9%, alcanzando un total de 320.281 habitantes en 1981. Para dar respuesta a la gran demanda de vivienda, se llevaron a cabo grandes promociones de vivienda protegida, desarrollándose en un tiempo relativamente corto, bajo un proyecto único, donde el planeamiento, gestión, parcelación, urbanización y edificación corresponden a un mismo agente público [3]. Estos proyectos de conjunto, que asumen el discurso del Movimiento Moderno y aplican los principios de diseño de la vivienda higiénica y soluciones constructivas recurrentes, dotaron a estos distritos de un carácter homogéneo que afectaba a un gran nivel de usuarios y crea una identidad propia.

Por todo ello, existe un gran potencial de ahorro energético en dichos distritos, que, junto con unas fuertes necesidades de mejora de las condiciones de confort, hacen que tenga sentido focalizar los esfuerzos sobre estas áreas urbanas y su consecuente actualización. En la figura 1 se presenta la ubicación en Valladolid y su alfoz de los proyectos R2CITIES, CITyFiED y REMOURBAN.



Fig. 1. Distritos de Cuatro de Marzo, Torrelago y Fasa-Delicias. Valladolid y su alfoz.

2.1 R2CITIES

El proyecto R2CITIES (Residential Renovation towards nearly zero energy CITIES), financiado por la Comisión Europea dentro del séptimo programa marco de Investigación y Desarrollo Tecnológico (7PM), tenía como finalidad desarrollar y demostrar estrategias abiertas y fácilmente replicables para diseñar, construir y gestionar proyectos de renovación energética de distritos a gran escala para conseguir ciudades de consumo nulo de energía. El barrio "Cuatro de Marzo" en Valladolid, España (ver Figura 2), es uno de los distritos en los que se ha implementado la metodología desarrollada en el proyecto, dando lugar a una renovación del distrito en la que se ha aumentado la eficiencia energética al mismo tiempo que se han incluido energías renovables para su suministro. Además de este distrito, otros dos forman parte de la etapa de demostración del proyecto, Yakacik en Kartal (Turquía) y Lavatrici en Génova (Italia). [4]



Fig. 2. Vista aérea del distrito 4 de Marzo en Valladolid

El distrito del Cuatro de Marzo. La construcción del barrio fue aprobado en 1957 e inaugurado el 29 de octubre de 1959. Es una zona residencial compacta de viviendas de calidad constructiva media baja y con una población en un progresivo envejeci-

miento. Consta de 1.941 viviendas, distribuidas en un total de 190 edificios. El barrio también se caracteriza por una alta densidad de población (200 hab./Ha.). El trazado urbano del barrio se planteó con diversos grupos de edificios en manzana cerrada alrededor de un patio común. así como otros bloques lineales en las calles principales. Además, el barrio cuenta con 4 escuelas, una iglesia y 25 locales comerciales.

Las viviendas son de propiedad privada y es habitual que cada unidad familiar posea su casa. Por lo tanto, los edificios son multifamiliares y multi-propiedad. Pero están organizados en Comunidades de Vecinos por cada edificio que gestionan los asuntos que afectan al mismo [4].

El proyecto de renovación urbana en el barrio fue promovido por el Ayuntamiento de Valladolid a través de la "Sociedad Municipal de Suelo y Vivienda de Valladolid – (VIVA, SL)" que tiene el papel de coordinador / supervisor de las obras de remodelación, así como de encargado de informar a los vecinos para adherirse al proyecto de rehabilitación urbana, para el cual es necesario el consentimiento de los mismos. [4].

Las acciones llevadas a cabo en Valladolid dentro de R2CITIES son las siguientes [4].

El barrio Cuatro de Marzo presentaba problemas comunes relacionados directamente con las pérdidas energéticas en calefacción, elevado consumo de energía y reducido confort interior. Las actuaciones se centraron en medidas pasivas para reducir la demanda energética (mejoras en el aislamiento de la envolvente térmica), así como medias activas de eficiencia energética con el objetivo de reducir el consumo tanto térmico (aplicación de las TICs), como eléctrico (sensor de presencia en zonas comunes, equipos de iluminación más eficiente y facturación detallada), y también para reducir las emisiones de CO_2 por medio de sistemas de energía térmica renovable. En estas actuaciones cada propietario tenía que aportar el 25% del importe total de la reforma, mientras que el 75% restante era subvencionado por las administraciones públicas (locales, regionales y gobiernos nacionales). Finalmente, este proyecto de reconversión energética se realizó en 13 comunidades del barrio para un total de 130 propietarios.

Medidas pasivas. El primer paso para conseguir una mayor eficiencia energética es minimizar la demanda, no sólo la reducción de la demanda de calefacción en invierno, sino también la reducción de la demanda de refrigeración en verano. Por estas razones se hicieron mejoras en el aislamiento de la envolvente térmica y la inclusión de elementos de sombreado en los edificios.

La mejora de la envolvente térmica del edificio para reducir su demanda energética de calefacción y refrigeración mediante actuaciones de mejora de su aislamiento térmico en fachada y cubierta, así como la mejora de las carpinterías, suponen unos ahorros energéticos estimados en torno al 30% del consumo total y un 17% de emisiones de CO_2 evitadas.

En la fachada se propuso la adición de aislamiento térmico por el exterior mediante un sistema SATE con los que se consiguieron valores de transmitancia de 0.26 W/m^2K, frente al 1.25 W/m^2K que tenía la fachada inicialmente.

En cuanto a los huecos de fachada se sustituyeron las ventanas o se colocó una ventana adicional por el exterior para mejorar la transmitancia térmica del hueco (vidrio+marco) consiguiendo unos ahorros energéticos estimados en torno al 40% del consumo total y un 7% de emisiones de CO_2 evitadas.

Por último, pero no por ello menos importante, también se mejoró el comportamiento térmico de las cubiertas, mediante la adicción de aislamiento térmico sobre el forjado de cubierta, o en el bajo cubierta, consiguiendo unos ahorros energéticos estimados en torno al 5% del consumo total y un 5-15% de emisiones de CO_2 evitadas.

En la Figura 3 se presenta el antes y el después de los trabajos realizados en la fachada de unos de los edificios involucrados en el proyecto.



Fig. 3. Detalle de los trabajo de aislamiento térmico de la envolvente térmica

Medidas activas. Se plantearon cuatro soluciones diferentes relativas a los sistemas activos. Alumbrado más eficiente, instalaciones de energía solar térmica para agua caliente sanitaria, la caldera de gas de condensación, y medidas basadas en las TICs.

- Mejoras en la eficiencia con respecto al consumo de energía eléctrica, alumbrado más eficiente (bombillas tipo LEDs) sustituirá a los sistemas de iluminación más antiguos, principalmente en las zonas comunes. La estimación de ahorro de energía por este cambio tecnológico es del 80% del consumo eléctrico en iluminación.
- Con una instalación solar térmica de aproximadamente 8 colectores de tipo termosifón por edificio y orientado hacia el sur, se espera producir suficiente agua caliente sanitaria para cubrir al menos el 60% de la demanda de ACS y la estimación de las emisiones de CO_2 evitadas son del 90% si se compara con una caldera convencional de gas.
- Caldera de gas de condensación: Se sustituyeron las calderas poco eficientes por calderas de gas de condensación con altos rendimientos energéticos que justo con la instalación de válvulas termostáticas en los radiadores se consiguen unos ahorros del 2% en el consumo térmico y del 20% de las emisiones de CO_2.

- Sensor de ocupación en las zonas comunes que se instalan para evitar desperdicio de energía cuando no es necesaria.
- La medición inteligente permite tener una factura más detallada, así como información sobre el consumo en tiempo real. Se estimó en varios estudios que este tipo de datos permiten ahorrar alrededor de 5% de la energía corriente consumida por una vivienda.
- Pérgola fotovoltaica para la carga de vehículo eléctrico (ver figura 4): es una solución constructiva que combina la generación de energía eléctrica mediante 37.5 m^2 de superficie de Paneles fotovoltaicos con propiedades de protección solar contra condiciones climáticas adversas.
  La energía generada por el sistema fotovoltaico puede abastecer edificios cercanos o puede inyectarse en la red, lo que logra un beneficio económico significativo en el distrito. consiguiendo unos ahorros en emisiones evitadas del 8%.



Fig. 4. Pérgola fotovoltaica para la carga de vehículo eléctrico.

En la Tabla 1 se presenta un resumen de los principales indicadores en la intervención del Cuatro de Marzo dentro del proyecto R2CITIES.

Tabla 1. Indicadores de intervención en Cuatro de Marzo dentro del proyecto R2CITIES.

Concepto	Valor
Área de demostración	21,234 m^2
Ciudadanos involucrados	340 habitantes
Calefacción + ACS	
ESTADO INICIAL	
Demanda energética	178,21 kWh/ m^2a
Contribución de Renovables	0 kWh/ m^2a
RESULTADO CONSEGUIDO	
Demanda energética	81,7 kWh/ m^2a
Contribución de Renovables	9,42 kWh/ m^2a
Ahorros energéticos totales conseguidos	54,16%

2.2 CITyFiED

El proyecto CITyFIED (Replicable and Innvoative Future Efficient Districts and Cities), cofinanciado por el VII Programa Marco de la UE, tiene como propósito desarrollar una estrategia replicable, sistemática e integrada para adaptar ciudades europeas y ecosistemas urbanos en las ciudades inteligentes del futuro. Una estrategia centrada en reducir la demanda energética y las emisiones de GEI e incrementar el uso de energías renovables desarrollando e implementando tecnologías y metodologías innovadoras para la reforma de edificios, redes inteligentes y redes de calor interconectadas con las TIC y la movilidad.

Los cinco pilares de la estrategia del proyecto:

- Demostraciones a gran escala, incluyendo tres renovaciones integrales de los distritos de Laguna de Duero-Valladolid (España), Soma (Turquía) y Lund (Suecia),
- Maximización del potencial de réplica a través de la organización de un clúster de ciudades y construyendo una comunidad de intereses.
- Desarrollo de metodologías y procedimientos innovadores y rentables para la planificación, la implementación y réplica de acciones energéticamente eficientes.
- Desarrollo de un modelo de negocio como apoyo a la estrategia para transformar áreas urbanas en distritos de “casi cero emisiones”.
- Difusión.

Entre las medidas propuestas están la rehabilitación de fachadas, la instalación de sistemas de calefacción de distrito (district-heating) basados en fuentes de energía renovables, la aplicación de TICs y de redes inteligentes.

El número de viviendas rehabilitadas en el ámbito del proyecto alcanzará las 2.328, repartidas entre los tres demostradores, con más de 7.000 ciudadanos involucrados en este proceso.

El distrito de Torrelago (Laguna de Duero). El distrito de Torrelago se ubica dentro del área metropolitana de Valladolid, en el municipio de Laguna de Duero. Está formado por 31 edificios de 12 plantas, con 4 viviendas en cada planta de aproximadamente 100 m^2 cada una, y está dividido en dos fases: la Fase1, con 12 edificios, y la Fase2, con 19, en un total de 1488 viviendas. Los edificios fueron construidos entre 1977 y 1981. El sistema inicial de calor estaba compuesto por dos redes independientes alimentadas por gas natural. La primera suministraba a los 12 edificios de la Fase1, y la segunda, a los 19 edificios restantes, Fase2 [5]. En la Figura 5 se presenta una imagen aérea del distrito de Torrelago con edificios ya intervenidos (color blanco) y los que faltaban por intervenir (color ladrillo).



Fig. 5. Vista aérea del distrito de Torrelago

Las acciones llevadas a cabo en Valladolid dentro de CITyFiED son las siguientes [5].

Calefacción de distrito. El proyecto de rehabilitación del distrito de Torrelago consiste en una mejora de la red de calefacción y ACS, a través de la sustitución de parte de las calderas de gas por otras de biomasa y de una renovación de parte de los sistemas de distribución y gestión de la energía. Uno de los objetivos del proyecto fue demostrar que estas intervenciones son viables técnica y económicamente, valorando de forma precisa los beneficios que aportan tanto desde el punto de vista del ahorro de energía, los efectos medioambientales y el bienestar de los usuarios.

El proyecto de rehabilitación se apoya en un diagnóstico inicial sobre el estado de los 31 bloques (estado actual de fachadas y cubiertas y posibilidades de intervención en la envolvente térmica) y de sus sistemas energéticos (consumos, eficiencia energética del actual sistema de calefacción y ACS, simulación de los ahorros posibles), así como en los planos y memorias de los seis proyectos básicos y de ejecución de Torrelago, visados entre 1976 y 1983. En la figura 6 se presenta algunas imágenes de la nueva central de producción con biomasa y contadores de energía térmica



Fig. 6. Nueva central de producción con biomasa y contadores de energía térmica

La producción de energía se realiza mediante tres calderas de biomasa que suman 3,5 MW de potencia, ubicadas en la nueva sala de calderas, y que estarán apoyadas en momentos puntuales por tres de las calderas de gas natural que suman 9 MW de potencia. El fraccionamiento de potencia de biomasa en tres calderas hace que la versatilidad y la fiabilidad en el suministro de energía sean máximas, adaptándose mejor a la demanda de calor en cada momento. El suministro se garantiza al emplear un sistema mixto, ya que quedan cubiertas las averías y retrasos de suministro con el sistema redundante. A nivel de viviendas se instaló un sistema que permite medir el consumo individual de cada vivienda que permite tomar decisiones sobre el control del uso del sistema de calefacción. Se instaló por tanto un termostato inalámbrico en el interior de cada vivienda comunicado con una válvula a la entrada de esa misma vivienda, lo cual permite seleccionar la temperatura de confort en cada momento e incluso el apagado total del sistema, evitando acciones como la apertura de ventanas por exceso de calor puesto que la energía que más ahorra es aquella que no se consume cuando no es necesario. La acción individual de cada vivienda permitirá adecuar la producción a la demanda real.

Rehabilitación de fachadas. Una mejora integral en las fachadas permite reducir la demanda térmica de los edificios y mejorar sus condiciones de confort. Sólo se actúa sobre la envolvente de ladrillo (U=1.36 W/m^2°C), sin modificar las dimensiones de los huecos de fachada y sin tocar la estructura de hormigón armado de los edificios (es una rehabilitación). En la figura 7 se presentan el antes y el después de la rehabilitación de la fachada de los edificios de Torrelago.



Fig. 7. Rehabilitación de las fachadas de los edificios. Antes y después de la intervención

Dada la elevada altura de las fachadas, se realizó un estudio de cargas, para concluir que la repercusión del peso del sistema de aislamiento sobre dicha estructura es

marginal y no compromete en ningún caso la seguridad estructural de los edificios. La actuación sobre la fachada consiste en la colocación de un sistema de aislamiento térmico por el exterior del ladrillo cara vista existente, mediante la fijación al mismo de planchas de Poliestireno Expandido de 80 mm de espesor. Esta fijación será por un lado de tipo químico, con cemento cola específicamente formulado para ello, y por otro lado mecánica, con espigas de cabeza ancha de polipropileno que penetrarán en el ladrillo unos 70 mm. El acabado sobre las placas de aislamiento consiste en una doble capa de cemento cola especialmente formulado para resistir a la intemperie dando lugar a una estructura tipo sándwich con una malla de fibra de vidrio de 160 gr/m, cuya misión es armar y estabilizar el revestimiento. Sobre el revestimiento se aplica finalmente el acabado acrílico con el color correspondiente y los aditivos anti-humedad y anti moho. A lo descrito hasta ahora se añadió distintos perfiles metálicos diseñados específicamente para resolver los encuentros de esquinas, alféizares, arranques, cumbreras, juntas de dilatación, etc. Los aspectos técnicos tenidos en cuenta para la elección del sistema constructivo son su resistencia, estabilidad y ligereza, además de ser completamente impermeable y a la vez muy transpirable (pese a su total estanqueidad al agua de lluvia, el revestimiento deja transpirar la fachada al permitir el paso del vapor de agua. Esta característica es clave para evitar las condensaciones). Por otro lado, su facilidad de montaje y modulación hace que se adapte muy bien a los condicionantes físicos con una configuración sencilla, obteniendo una transmitancia térmica (U=0.339 W/m^2°C) y una respuesta a condensaciones óptimas.

En la Tabla 2 se presentan un resumen de los principales indicadores en la intervención de Torrelago-Valladolid dentro del proyecto CITyFiED.

Tabla 2. Indicadores de intervención en Torrelago-Valladolid dentro del proyecto CITyFiED.

Concepto	Valor
Número de viviendas	1,448
Área acondicionada rehabilitada	143,025.36 m^2
Demanda energética inicial	138.56 kWh/m^{2}a
Demanda energética tras Rehabilitación	89.26 kWh/m^{2}a
Ahorro Energético	35.58%
Contribución de energías Renovables	59.41%
Reducción de emisiones de CO_2	3500 t/a

2.3 REMOURBAN

REMOURBAN (REgeneration MOdel for accelerating the smart URBAN transformation) es un “lighthouse project” demostrativo diseñado para implantar un modelo de regeneración urbana. Está financiado por la Unión Europea a través del programa marco de investigación e innovación Horizonte 2020 y apuesta por una transformación sostenible de la ciudad a través de la eficiencia energética, la movilidad eléctrica

y las plataformas digitales, lo que permitirá mejorar la calidad de vida de todos los ciudadanos y acelerar la transformación de las ciudades europeas en áreas urbanas inteligentes para el progreso social y la regeneración ambiental, así como en áreas de atracción y motor del crecimiento económico [6].

Para conseguir estos objetivos, Valladolid junto con Nottingham (Reino Unido) y Tepebasi (Turquía) se convierten en ciudades "faro" o de referencia en la implantación de un modelo de regeneración urbana integral y sostenible, a través de soluciones tecnológicas innovadoras en los sectores de la energía, el transporte y las TIC. Además, el modelo será susceptible de ser replicado en otras dos ciudades seguidoras de la UE, Seraing (Bélgica) y Miskolc (Hungría) [6].

El distrito de Fasa-Delicias. El barrio (ver Figura 8), que fue construido durante los años 60 para los trabajadores de la factoría Renault en Valladolid, está formado por 19 bloques, una torre y un edificio que alberga la central térmica que abastece de calefacción a las 398 viviendas con 24.700 m^2 de superficie calefactada. Los edificios presentan deficiencias en su aislamiento térmico que se traducen en falta de confort, además de en una ineficiencia energética. La red de calefacción se compone de tres circuitos, alimentada por dos calderas, mientras que el sistema de agua caliente sanitaria es individual con diferentes fuentes energéticas [6].



Fig. 8. Distrito del Grupo de Viviendas FASA-Renault.

Las acciones llevadas a cabo en Valladolid dentro de REMOURBAN son las siguientes [6].

Rehabilitación energética de edificios. En un barrio emblemático de Valladolid (la comunidad de propietarios del parque residencial de FASA), 24.000 m^2, 398 vivien-

das, 1.000 residentes y una revisión de 50% de ahorro de energía. Además, suministro de energía con renovables: Calefacción de distrito con biomasa, para calefacción y agua caliente sanitaria y paneles fotovoltaicos en fachada para generación de energía eléctrica. En la figura 9 se presenta el antes y el después de la rehabilitación de uno de los edificios de Fasa-Delicias, incluida la fachada con paneles fotovoltaicos para generación de energía eléctrica renovable.



Fig. 9. Rehabilitación de las fachadas de uno los edificios. Antes y después de la intervención

Despliegue de vehículos sostenibles. Adquisición de un autobús eléctrico y otro híbrido para la flota de autobuses (ver figura 10). Se suma esto a un plan de promoción para la adquisición de en torno a veinte taxis eléctricos, dos vehículos eléctricos para la flota del Ayuntamiento y 20 vehículos eléctricos privados. Integración en el proyecto de 5 vehículos eléctricos de reparto de última milla (reparto de mercancías).



Fig. 10. Vehículos eléctricos adquiridos con el proyecto REMOURBAN.

Infraestructura de recarga. Se complementa con la ampliación y mejora de la red de recarga urbana, que actualiza los 13 puntos ya existentes y añade cinco nuevos puntos para taxis y cuatro para autobuses (ver Figura 11). Asimismo, se contemplaron ayudas para estimular la instalación de 20 puntos de carácter general y privado vinculados a hoteles o centros comerciales.



Fig. 11. Vehículos eléctricos adquiridos con el proyecto REMOURBAN.

Plataforma de información. Despliegue de una plataforma de recogida de información a escala de la ciudad. Los resultados del plan REMOURBAN se pueden cuantificar gracias a la plataforma, que permitirá monitorizar y analizar los datos de generación y consumo de energía para vigilar la emisión de CO_2.

En la Tabla 3 se presenta un resumen de los principales indicadores en la intervención de Fasa-Delicias dentro del proyecto REMOURBAN.

Tabla 3. Indicadores de intervención en Fasa-Delicias dentro del proyecto REMOURBAN

Concepto	Valor
Número de viviendas	398
Área acondicionada rehabilitada	34000 m^2
Demanda energética inicial	369 kWh/m^2a
Demanda energética tras Rehabilitación	220 kWh/m^2a
Ahorro Energético	40%

3 Discusión y conclusiones

La construcción de ciudades más sostenibles con edificios y distritos inteligentes es un proceso complejo que requiere de la participación de muchos agentes, y en el cual los ciudadanos juegan un papel fundamental. Valladolid, junto como su área metropo-

litana, ha apostado firmemente por un desarrollo más sostenible de sus áreas urbanas residenciales consolidadas. En particular la implementación de los proyectos R2CITIES, CITyFiED y REMOURBAN está facilitando y acelerando de manera sustancial esta transformación urbana. Para ello se ha desplegado una estrategia sistémica para la correcta toma de decisiones en relación a las intervenciones para la renovación energéticamente eficiente y sostenible de áreas urbanas, y que permite adoptar distintas soluciones tecnológicas a nivel de distrito y edificio basadas en:

- Reducción de la demanda y consumos energéticos según condiciones climáticas, diseño, materiales, equipamiento, y sistemas más eficientes desde el punto de vista energético.
- Producción de energía a nivel local a partir de fuentes renovables como solar térmica, solar fotovoltaica, biomasa, etc.
- Implementación de sistemas de calefacción y refrigeración de distrito basados en energías renovables o individuales eficientes, y de las Tecnologías de la Información y Comunicación, TICs.
- Uso de herramientas basadas en la tecnología de Modelado de la Información de Construcción, BIM- Building Information Modeling, que permitan un control real de todo el proceso.
- Uso de modelos contractuales basados en el concepto de Entrega de Proyecto Integrado, IPD, Integrated Project Delivery.

Referencias

1. El Papel de las Normas en las Ciudades Inteligentes. AENOR (2014)
2. Sostenibilidad urbana en América Latina y el Caribe. Banco Interamericano de Desarrollo. 2011.
3. Font Arellano, A. et al., Valladolid. Procesos y formas del crecimiento urbano, Valladolid, (1976).
4. Página web R2CITIES, http://r2cities.eu/, ultimo acceso 2018/07/11
5. Página web CITyFiED, http://www.cityfied.eu/, ultimo acceso 2018/07/11
6. Página web REMOURBAN, http://www.remourban.eu/, ultimo acceso 2018/07/11

Agradecimientos

El proyecto R2CITIES, CITyFiED y REMOURBAN ha recibido fondos del Séptimo Programa Marco y del Programa H2020 de la Unión Europea para investigación, desarrollo tecnológico y demostración bajo el acuerdo de subvención número 314473, 609129 y 646511, respectivamente.

Hacia una Universidad de Concepción Sustentable: Implementación de Proyectos Energéticos

Luis GARCÍA SANTANDER[1]; G. RETAMAL[1]; D. CARRIZO[2]; F. ULLOA[3]

[1] Universidad de Concepción, Concepción, Chile luis.garcia@udec.cl
[1] Universidad de Concepción, Concepción, Chile garetamal@udec.cl
[2] Universidad de Atacama, Copiapó, Chile dante.carrizo@uda.cl
[3] Universidad Tecnológica Metropolitana, Santiago, Chile fulloa@utem.cl

Abstract. Los altos costos de la energía eléctrica, la constante preocupación por el medio ambiente y la responsabilidad como entidad de enseñanza superior que forma profesionales, ha llevado a la Universidad de Concepción (UdeC) a establecer una política de eficiencia energética, fijando metas anuales en términos de mejorar sus indicadores energéticos y reducir sus costos de facturación. Desde el año 2007 a la fecha se realiza un permanente seguimiento de los consumos energéticos (agua, gas, electricidad) de los principales edificios y reparticiones. Para el año 2017 el consumo total de energía eléctrica fue de 11,6 GWh/año, equivalentes a una facturación anual de €1.500.000. En los años 2013, 2015 y 2016 se implementan soluciones tecnológicas basadas en recambio de luminarias a base de tecnologías LED y de sistemas de telegestión para el sistema de iluminación pública del Campus. Los proyectos tecnológicos permitieron alcanzar ahorros cercanos al 60% en cada caso, totalizando un ahorro aproximado de €165.000 anuales, mejorando la calidad de iluminación y aumentando la sensación de seguridad al interior del campus.

Keywords: Gestión y Eficiencia Energética, Universidad Sustentable, Reducción de la Huella de Carbono.

1 Introducción

Entre los años 2000 y 2010 el precio de la energía eléctrica en Chile fue uno de los más altos del mundo, llegando a valores que bordearon los 300US$/MWh, ocasionando con ello graves daños a la economía del país impactando fuertemente en el desarrollo industrial y comercial de los sectores productivos. Los clientes finales debían pagar elevadas facturas, generando en algunos casos el cierre de empresas que no lograban competir con los precios establecidos en los mercados internacionales [1].

Desde el año 2011, el estado de Chile ha jugado un rol determinante en el establecimiento de políticas públicas al otorgar facilidades a través de la promulgación de nuevas leyes y reglamentos que permitieron una apertura del mercado eléctrico hacia la incorporación de nuevos actores a través de las tecnologías a base de energía renovables, sumado a ello las importantes modificaciones a los modelos de licitación de

energía, provocó que en los años 2016 y 2017 se alcanzaran precios de energía similares a los países desarrollados llegando en la última licitación a un precio promedio de 32,5 US$/MWh con una penetración de energías renovables a base fundamentalmente fotovoltaica y eólica cercana al 20% de la matriz energética [2].

De acuerdo a los proyectos energéticos aprobados éste año, cerca del 100% son a base de recursos renovables tales como eólico y solar. El año 2016, el estado chileno publica La Política Energética 2050, donde se establecen los pilares que la sostienen y donde están explícitos las Energías Renovables y la Eficiencia Energética [3].

La comunidad día a día, adquiere un grado de mayor responsabilidad con el medioambiente y sobre todo en temas que le afectan individual y colectivamente en forma directa. Diversos proyectos de generación de energía se han visto obstaculizados por la fuerza que la comunidad ha adquirido, privilegiando el cuidado al medioambiente y el impacto social que puede tener la instalación de nuevas centrales de mediana y gran envergadura [4 y 5]. A raíz de lo anterior, las empresas del sector energético han ido involucrando desde los inicios del proyecto a las comunidades, obteniendo así una buena disposición de estos actores para una instalación responsable de las nuevas fuentes de generación y los tendidos eléctricos asociados a dichos proyectos.

La Universidad de Concepción, no está ajena a esos cambios en la comunidad. Como centro de educación superior del más alto nivel y el desarrollo de investigación aplicada a los sectores productivos de la región del Bio Bio, del país y del mundo, cumple un rol determinante en la Formación de los Profesionales del futuro, quienes deberán diseñar e implementar proyectos de alto impacto, considerando aspectos técnicos, económicos, sociales y medioambientales.

A partir de marzo del año 2004, en cursos de últimos semestres de la Carrera de ingeniería eléctrica, se comienza a levantar información concerniente a los edificios y reparticiones existentes al interior del campus Concepción de la UdeC. Estos trabajos, permiten obtener los primeros datos del comportamiento de las instalaciones y consumos de energía eléctrica generando un diagnóstico del sector eléctrico e identificando áreas deficientes y estableciendo oportunidades de mejora tanto para el cumplimiento de la normativa vigente como para obtener reducciones en los montos de facturación y emisiones de CO_2. Entre ellos se pueden destacar el edificio de Biblioteca Central (Ver Figura 1) que al año 2003 representaba el 7% del consumo total del Campus Concepción y el sistema de alumbrado público de áreas verdes, tráfico vehicular y peatonal (Figura 2).



Figura. 1. Biblioteca Central Universidad de Concepción, vista de día y nocturna [6].

Desde el año 2007, la UdeC mantiene una supervisión respecto de los registros mensuales de los consumos de energía eléctrica (facturas) para los empalmes más importantes de la UdeC. Considerando los 8 empalmes con mayor consumo en el Campus Concepción, el consumo de energía para el año 2016 fue aproximadamente de 11,6(GWh) (11,6 millones de kWh/año), equivalentes a una facturación anual de €1.500.000 (1,5 millones de euros). El principal consumo en la UdeC, corresponde a sistemas de iluminación, lo que es equivalente al 70% del consumo eléctrico total.



Figura. 2. Campus Concepción, Universidad de Concepción [7].

A continuación se describirán dos casos de diagnóstico y que a la fecha se encuentran implementados. En ambos proyectos se han logrado ahorros cercanos al 60% en cada uno de ellos, obteniendo ahorros totales próximos a € 165.000 por año.
Este trabajo tiene como objetivo por una parte demostrar que el establecimiento de políticas energéticas respaldadas por las autoridades universitaria permite impactar positivamente en distintos ámbitos del quehacer de una universidad, haciendo partícipes al profesional administrativo, investigadores y principalmente a los profesionales del futuro y por otro lado impactar en aspectos técnicos tales como reducir los costos asociados a facturación de energía eléctrica, las emisiones de CO_{2eq} y mejorar la calidad de la iluminación y seguridad en las áreas involucradas.
El artículo comienza con una Introducción al tema desarrollado, continuando con la sección 2 en que se describe brevemente el campus de la universidad donde fueron aplicados los casos de eficiencia energética; en sección 3 se exhibe la metodología implementada para cada proyecto; la sección 4 entrega información de la implementación y los resultados obtenidos hasta la fecha y finalmente la sección entrega las conclusiones del artículo.

2 Campus Concepción, Universidad de Concepción

En los siguientes párrafos se procede a entregar información general del Campus Concepción de la UdeC a modo de dimensionar la infraestructura y la distribución de las cargas consumidoras de energía eléctrica.

2.1 Breve Descripción

La Universidad de Concepción fue fundada el año 1819 y nace como una forma de rechazar el centralismo de la capital Santiago. Es una de las tres universidades más prestigiosas de Chile. Está emplazada en un terreno de 1.029.722 m^2, al año 2016 tenía una matrícula de 25.003 alumnos de pregrado, 91 carreras, más de 57.000 titulados y 1.313 docentes a tiempo completo con 85% de ellos con postgrado. A nivel de postgrado cuenta con 3.027 estudiantes, 129 programas de postgrado (doctorado, magister, diplomados).

Desde el punto de vista eléctrico, la empresa eléctrica suministra energía a la UdeC a través de 8 empalmes (puntos de conexión) independientes. Legalmente la UdeC es un Cliente Regulado, lo cual implica que está sometida a una estructura de contrato eléctrico con duración de un año (12 meses de abril a abril) y posee una de las 24 opciones tarifarias existentes en la regulación chilena y que los usuarios optan en función del conocimiento que tengan respecto a su perfil de consumo. La UdeC tiene en sus 8 empalmes la opción tarifaria horaria definida como AT4.3 en la cual se paga por el consumo de energía eléctrica, potencia de demanda máxima suministrada y demanda máxima en horas de punta. Las tarifas horarias conllevan un control de la demanda en las horas de punta, requiriendo por lo tanto un monitoreo y supervisión permanente del consumo para no caer en registros de altas demandas y como consecuencias en elevados montos de pagos por dicho concepto. A modo de ejemplo sencillo 1 kW de demanda suministrada tiene un valor aproximado de € 1, en cambio un kW de demanda en horas de punta tiene un valor de € 10. La energía total consumida por la UdeC el año 2017 fue de aproximadamente 11,6 GWh con una demanda máxima suministrada total de aproximadamente 3,8 MW (considerando simultaneidad de demanda). Las principales cargas que están presente en la UdeC son las asociadas a los sistemas de iluminación, los cuales alcanzan a cifras cercanas al 70% del total del consumo.

En informe preparado por la Agencia Chilena de Eficiencia Energética el año 2013 [17] se destacan un conjunto de recintos universitarios que se suman al desafío por la eficiencia energética, todo esto en línea con la estrategia energética que establece el estado chileno y que se plasma en los pilares de Educación, Industria, Transporte, Edificación y Medición. Por otra parte en el año 2010, gracias a una iniciativa de la Univ. de Indonesia se crea el sistema *UI GreenMetric Wordl University Ranking* [16], el cual permite ordenar a las universidades de acuerdo a ciertos criterios energéticos medioambientales, al año 2016 se reportaban 516 instituciones inscritas, de las cuales 53 son latinoamericanas, siendo las inglesas las que representan mejores indicadores. En [18] se presenta un resumen del estado de los países latinoamericanos y del caribe en términos de la situación y perspectivas de la eficiencia energética, demostrando que al año 2009 se registran notorias diferencias entre políticas energéticas establecidas por los propios estados, fuentes de financiamiento, capital humano, entre otras. Por su parte en [19] los autores ponen énfasis en cómo integrar los nuevos dispositivos Smart meter a través de la internet de las cosas, con el fin de medir, almacenar y analizar los datos provenientes de los puntos de consumos (edificaciones, cargas específicas, etc.) y gestionar de manera eficiente los recursos energéticos logrando con

ello minimizar las emisiones y los montos de las facturaciones. Los autores de [20] realizan una revisión en la temática referente a la problemática de predicción de la demanda y las técnicas y modelos empleados para ello. Estimar el comportamiento de la demanda con un alto grado de certeza, permite tanto al propio consumidor como a quien provee el suministro eléctrico, controlar y gestionar de manera más eficiente el recurso energético.

3 Metodología Implementada para los Proyectos

En los siguientes párrafos se describe la metodología seguida para lograr la implementación de soluciones energéticas en los casos de estudio, obteniendo resultados comparativos a través de mediciones registradas antes y después de la ejecución del proyecto.

3.1 Levantamiento y Validación de Información Técnica

Sabiendo que el principal consumo de energía eléctrica en el campus universitario es la iluminación, se consideró que diferentes grupos de estudiantes de último año de ingeniería eléctrica, realizaran como parte de una asignatura obligatoria un proyecto relacionado con Eficiencia Energética e Incorporación de Tecnologías para los edificios de mayor consumo en el campus universitario. Los estudios debían generar en una primera etapa el levantamiento de información actualizada de las edificaciones seleccionadas, siendo validadas a través de los planos eléctricos y las visitas in-situ por dichas instalaciones. El desarrollo del proyecto consideró el uso de instrumentos de medición tales como luxómetro para verificar condiciones y niveles de iluminación de cada recinto y de equipos de medición de variables eléctricas para obtención de perfiles de consumos y validar recomendación de contrato tarifario. Cada grupo suministra como producto final del proyecto una actualización de la información de las instalaciones eléctricas, en particular iluminación, generar un plano eléctrico en formato digital, emitir un informe de diagnóstico, identificar áreas o zonas que no cumplen aspectos normativos de nivel lumínico y de seguridad eléctrica, evaluar técnica y económicamente reemplazo tecnológico e incorporación de nuevas tecnologías de automatización y recomendar la mejor opción.

A partir de los proyectos desarrollados y de los resultados finales entregados por los estudiantes, se propuso a las autoridades de la Universidad evaluar la posibilidad cierta de analizar la factibilidad de implementar tres soluciones.

La primera opción seleccionada fue el recambio tecnológico de iluminación en edificio de Biblioteca Central, la cual poseía 13.000 tubos fluorescentes de 20W cada uno (equivalente a 299 kW considerando 15% de pérdidas en los balastros electromagnéticos). Cada conjunto de luminarias estaba conformada por 4 tubos de 20W tal como se muestra en Figura 3a. Estas fueron reemplazadas por 3.250 palmetas led de 36W cada una (Ver Figura 3b), reduciendo la potencia total de la Biblioteca Central a

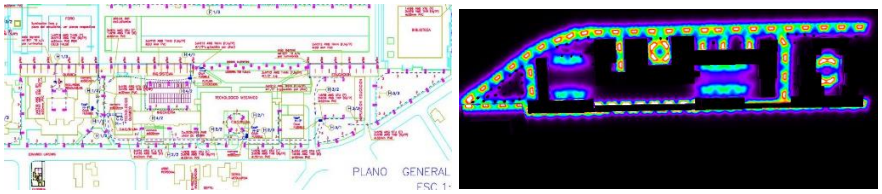
117kW, equivalentes a un 39% de la potencia inicial total, logrando así una reducción del 61% en la facturación de energía de manera inmediata.



(a) **(b)**

Figura. 3. Luminarias con 4 tubos fluorescentes de 20W y palmeta Led de 36W [8,9].

El segundo proyecto escogido se asocia al sistema de alumbrado púbico del campus, el cual permite iluminar las áreas verdes, las vías peatonales y las avenidas para vehículos motorizados. El campus cuenta de 1.274 luminarias con una potencia total de 188 kW y un consumo de energía de 813.450 kWh/año. El proyecto de recambio permitió reducir a una potencia de 66 kW equivalentes a un consumo de 284.600 kWh/año, lo cual proporciona un ahorro del 65% aproximadamente. La Figura 4a muestra un diagrama descriptivo del emplazamiento de las luminarias públicas del campus y la Figura 4b corresponde a resultado de una simulación al reemplazar las luminarias por tecnologías LES (simulado Dialux versión gratuita descargada en versión de prueba).



(a) **(b)**

Figura. 4. Sistema de alumbrado público en campus universitario [10].

Finalmente el tercer proyecto seleccionado está ligado a la necesidad de disponer de una plataforma de monitoreo, supervisión y gestión de los consumos a través equipos de medición remota, garantizando con ello una gestión eficiente de uso de la energía al interior del campus universitario, controlando además las demandas de potencia en horas de punta, entregando curvas de perfiles de consumo para seleccionar adecuadamente la opción de contrato tarifario. En el año 2007 se disponía de una veintena de medidores con medición remota que estaban instalados a lo largo del campus, en los puntos que se consideraron como relevantes en su oportunidad. El trabajo desarrollado por el estudiante contó con la colaboración de la empresa Schneider Electric que facilitó la plataforma comercial Enterprise y que sirvió de apoyo para la toma de decisión final en la implementación que se debe concretar en el mes de julio 2018. La

Figura 5 (superior) muestra esquemáticamente los puntos de medición en el interior del campus y la Figura 5 (inferior) exhibe el detalle específico de los equipos de medición existentes en un edificio de la facultad de ingeniería.



Figura. 5. Plataforma de Gestión Energética en Campus Universitario, facilitada por Schneider Electric [11].

Los datos de consumos de las instalaciones en estudio fueron obtenidos a partir de los registros históricos que estaban disponibles por los profesionales del área de mantención de la UdeC. Se consideró un año de registros en cada punto. Los planos impresos para los edificios en estudios fueron aportados por la dirección de servicios de la universidad, dado que no se contaban con planos digitalizados por tratarse de edificios muy antiguos. Finalmente para el sistema de alumbrado público se entregaron planos digitalizados e impresos con las especificaciones de cada luminaria instalada. La validación de los equipos instalados tanto en los edificios seleccionados como en los sis-

temas de alumbrado público se realizó comparando lo descrito en los planos y lo existente en terreno. Los cambios detectados fueron incluidos en el desarrollo de los proyectos y se generaron adicionalmente planos digitales para aquellas reparticiones que sólo disponían de información impresa.

3.2 Proceso de Licitación de Proyectos

Los proyectos que involucran recambio en sistemas de iluminación por tecnología LED, esto es Biblioteca Central y Alumbrado Público, consideraron procesos abiertos de licitación con la participación de diversas empresas nacionales del sector energético y tecnológico. En el año 2013, momento en el cual se genera la primera licitación para ofertas de recambio en Biblioteca Central, se exige una condición novedosa para el mercado y que consistió en una modalidad de pago contra-ahorros. Tanto para el proyecto de Biblioteca Central como el de Alumbrado Público, la inversión total la realiza el oferente que se adjudica la licitación y la Universidad emite un pago fijo mensual equivalente al ahorro estimado tanto por el propio oferente como la Universidad a través de sus profesionales, por un periodo también determinado por el estudio. Los sistemas de iluminación cuentan con garantía hasta el pago de la última cuota. Los proyectos tienen duración de 36 meses para Biblioteca Central y de 60 meses para Alumbrado Público y telegestión.
El proyecto de Plataforma de Gestión Energética se licitó y establece la inversión en equipos de medición remota para más de 70 edificaciones y una actualización de las interconexiones con los servidores de la plataforma adquirida. Adicional a la inversión anterior, se considera un pago mensual fijo por concepto de mantención de la plataforma de manera tradicional y que garantiza además las actualizaciones que pueda ir generando la propia plataforma a lo largo de los años por la empresa propietaria.

4 Implementación y Resultados Obtenidos

Se mostrarán las condiciones de implementación para cada uno de los proyectos, registros y comportamientos antes del cambio y con posterioridad al proyecto, permitiendo comparar los consumos de energía eléctrica, cuantificando los ahorros en energía y huella de carbono, así como también, en su facturación mensual y anual.

4.1 Biblioteca Central

La Biblioteca Central es un edificio que comenzó su construcción en el año 1967 e inicio su funcionamiento el año 1971. Es la principal Biblioteca de Campus Universitario en la cual congrega la participación de estudiantes de toda la universidad. Consta de cuatro pisos, con una superficie construida de aproximadamente 10.000 m^2. Su potencia eléctrica sólo en sistemas de iluminación, estaba conformada por 13.000 tubos fluorescente de 20W cada uno de ellos con un balastro electromagnético, lo que totatizaba 299kW y un consumo anual estimado en 1.361.646 kWh/año (1,36 GWh/año) equivalente a una facturación anual sólo en energía en $122.548.140 (€

165.605). La luminaria existente en Biblioteca Central estaba conformada por 4 tubos de 20W más su balastro. La Biblioteca Central representaba al año 2013 cerca del 7% del consumo total del campus universitario. El recambio tecnológico fue adjudicado a empresa ILED LTDA. la cual realizó el cambio de la luminaria fluorescente por palmetas LED de potencia nominal 36W, con lo cual la potencia total se reduce a 117kW equivalentes a un consumo energético anual de 532.818 kWh con una facturación equivalente a $47.953.620 (€ 64.802), y un ahorro de $74.594.520 (€ 100.803) correspondiente al 61%. Se estima una reducción anual de 190 toneladas de CO_2 equivalente.

El proceso de recambio se ejecutó entre los meses de enero y abril. El valor cuota mensual fue cercano a $6.200.000 (€ 8.378) por un periodo de 36 meses. Se contempla una garantía total durante los 36 meses de duración del contrato, en caso de falla de equipos en ese periodo.

La Figura 6 muestra el hall central de la Biblioteca Central antes (a) y después (b) del cambio de las luminarias. Las mediciones de niveles lumínicos se modificaron de valores promedio de 380 lux a 650 lux, logrando una mejor calidad y uniformidad de la iluminación en los espacios del recinto intervenido. Las mediciones de potencia y energía más el pago en las facturaciones en los meses posteriores al recambio validaron los estudios teóricos previos, obteniendo disminuciones próximas al 60%.



(a) **(b)**

Figura. 6. Sistema de Iluminación Biblioteca Central. Antigua (a); Nueva (b) [8,9].

4.2 Alumbrado Público y Telegestión

Este proyecto consideró el recambio de todo el sistema de iluminación pública del campus universitario, el cual consta de 1.240 luminarias, con diversas tecnologías de lámparas entre las cuales se pueden mencionar: haluro, sodio y mercurio. La potencia total es de 188kW con una energía anual de 813.450 kWh/año y una facturación sólo por concepto de energía de $73.210.500 (€ 98.933). El proyecto fue adjudicado a empresa ILED LTDA. y la tecnología utilizada para las luminarias públicas tanto viales como peatonales son de la empresa canadiense Led RoadWay Lighting. Del total reemplazadas, 504 luminarias están monitoreadas y gestionadas mediante un sistema de telegestión. Este permite realizar una supervisión y control a distancia de

cada una de ellas, reportando además otras variables de interés tales como estado de fallas, reporte de consumos diarios, semanales, mensuales, anuales, así como también programar curvas de consumo según horario de uso, entre otras características de gestión. El campus universitario de la ciudad de Concepción (al mes de abril del 2017) se constituía en el primer campus universitario a nivel mundial en incorporar la telegestión en su sistema de alumbrado público. Hoy en día la plataforma de telegestión, está siendo incorporada como herramienta de apoyo (solo visualización) en la asignatura de Gestión y Eficiencia Energética en Sistemas de Distribución (GEEenSD). La nueva potencia total es de 66kW, lo que corresponde a un consumo energético de 284.600 kWh/año y a una facturación anual de $25.614.000 (€34.613). Los ahorros anuales sólo por concepto de energía totalizan $47.596.500 (€64.319) y equivalen a un 65%. El valor cuota de cada mensualidad se acordó en aproximadamente $4.000.000 (€ 5.405) por un periodo de 60 meses. Las emisiones se han reducido anualmente en 190 toneladas de CO_2 equivalente.
La Figura 7 muestra el esquemático de distribución de las luminarias telegestionadas emplazadas en el campus (puntos grises) y la Figura 8 permite observar los ahorros mensuales obtenidos en el último año al realizar el recambio tecnológico en las 504 luminarias.

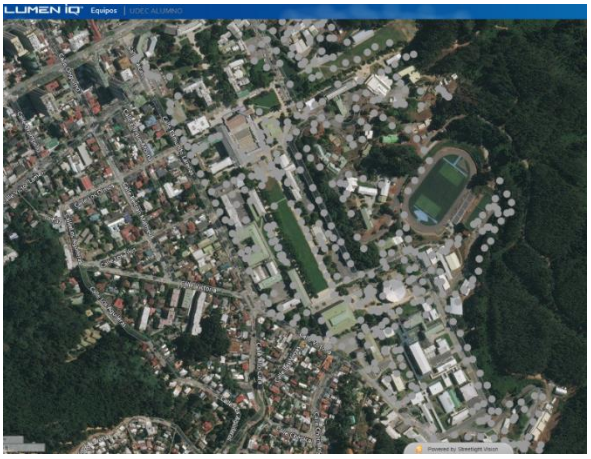


Figura. 7. Sistema de Iluminación en Biblioteca Central [12]

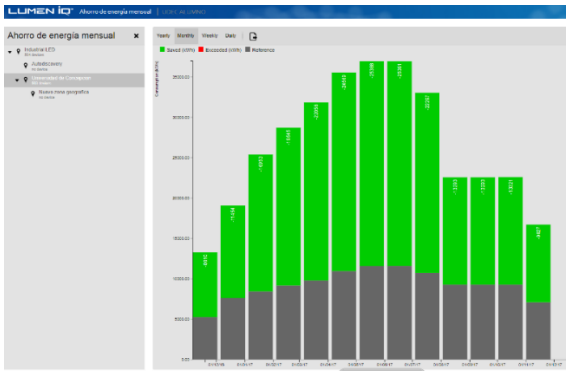


Figura. 8. Sistema de Iluminación en Biblioteca Central [12]

En Figura 8, se exhiben en color verde la energía ahorrada mensualmente al cambiar la lámpara antigua por una de tecnología LED. Los ahorros obtenidos corresponden a las estimaciones realizadas al inicio del proyecto. Los niveles lumínicos mejoraron en todas las luminarias que se cambiaron, siendo de mayor impacto en las luminarias viales. La nueva iluminación al entregar una luz blanca, genera una mayor sensación de seguridad a la comunidad y entrega adicionalmente una mejor calidad para las cámaras de seguridad, permitiendo distinguir sin ambigüedad características de colores más cercanos a la realidad e identificando rostros y elementos existentes en las zonas vigiladas.

En Figura 9, se aprecia la calidad de la iluminación y la identificación de colores y formas de los cuerpos dispuestos en los alrededores de los puntos de iluminación LED.

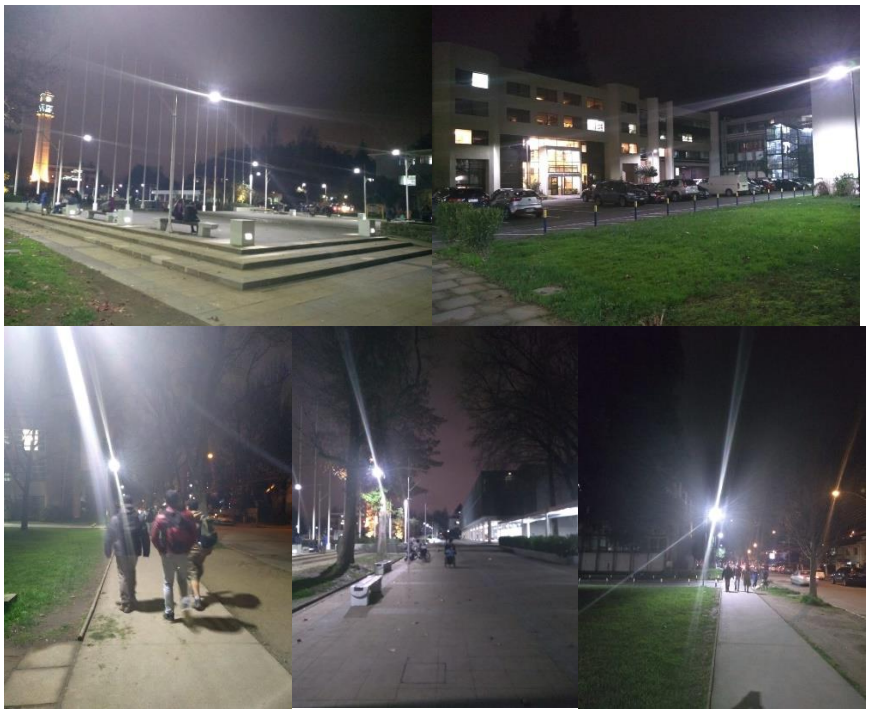


Figura. 9. Sistema de Iluminación en Alumbrado Público LED [Propia]

4.3 Plataforma de Gestión Energética Campus Concepción

El campus universitario en Concepción tiene 8 empalmes donde la compañía eléctrica suministra energía y realiza las mediciones de los consumos energéticos para su facturación. Solo dos empalmes tienen como carga un solo edificio, los otros 6 empalmes concentran la medición de 5 y hasta 20 edificaciones. El pago de las facturas no las realiza cada edificio sino que se hace de forma centralizada, siendo esto una causa importante para que no se tomen acciones de eficiencia por cada repartición dado que no repercute en sus gastos operaciones anuales. Trabajos previos, realizados por profesionales de la universidad lograron instalar en algunas reparticiones importantes, equipos de medición adicionales de la marca Schneider Electric en su modelo ION7300. Un trabajo de titulación [11] permitió concretar la implementación piloto de la Plataforma de Gestión Energética Power Logic ION Enterprise y con ello capturar información en línea de cada punto de medición y observar sus perfiles de consumo, identificando comportamientos que dan oportunidades de alcanzar ahorros con una adecuada gestión de la demanda energética. La Figura 10 lista tanto el conjunto de equipos ION7300 como sus emplazamientos en las reparticiones que se tenían disponible al año 2015.

SS EE	Trafos	Tipo de Medición	Equipos de Medición
Aeroespacial	General	Digital	1
Nuevos Institutos	General	Análoga	6
Central Térmica	Biblioteca Central	Digital	2
	Edificio Salvador Galvez	Digital	
Tecnológico Mecánico	Transformador N°1	Análoga	3
	Transformador N°2	Análoga	
	Transformador N°3	Análoga	
Tecnológico Químico	Servicios	Análoga	3
	Ingeniería	Análoga	
	Computación Ingeniería	Análoga	
Farmacia	General	Análoga	3
Arco Medicina	General	Análoga	4
Facultad Ciencias Físicas y Matemáticas	General	Análoga	0
EULA	EULA	Digital	2
Odontología	Transformador N°1	Análoga	0
	Transformador N°2	Análoga	0

Figura. 10. Listado de reparticiones con equipo de medición ION7300 instalado [11].

La Figura 11 y Figura muestran curvas de demandas semanales y diarias, respectivamente, para el punto de medición en el edificio de Aeroespacial. Se aprecia claramente en Figura 11 el comportamiento para los días de semana y los fines de semana. Además se observa un perfil similar para los días de semana (lunes a viernes) con una demanda máxima de 70 kW que se alcanza aproximadamente a las 11 de la mañana, así también se identifica un mínimo a las 14 horas, coincidente con la hora de almuerzo entre las 12:30 y 14:30 horas del personal administrativo del campus. Finalmente se retoma la curva hasta las 18 horas momento en el cual nuevamente se reduce producto del fin de la jornada laboral para los administrativos. La actividad académica permanece pero más reducida. Es importante notar que la demanda máxima desciende de 60 a 30 kW en un plazo de 2 horas (18 a 20 horas), lo cual implica que se puede reducir en un 50% el pago por concepto de demanda en horas de punta, teniendo un impacto en los montos totales de las facturaciones energéticas. De las curvas de carga, se detecta una demanda mínima de 20 kW permanente asociado a cargas que permanecen conectadas las 24 horas del día.

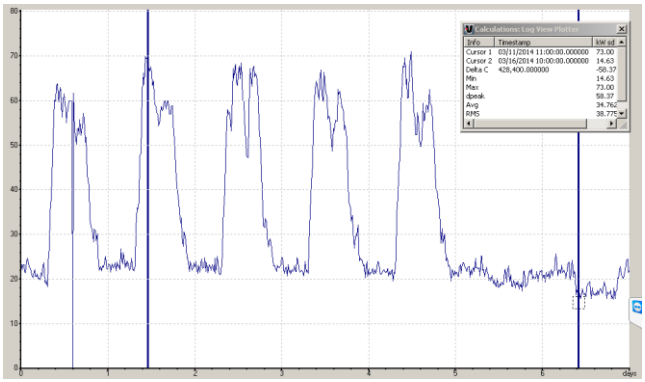


Figura. 11. Perfiles de demanda semanal en Aeroespacial [11].

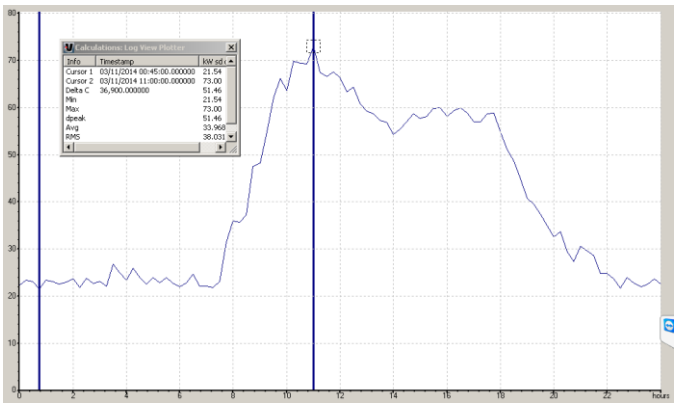


Figura. 12. Perfil de demanda en diario en Aeroespacial [11].

Los resultados obtenidos en el piloto y los estudios detallados en nuevos equipamientos de medición disponible en el mercado, facilitaron la toma de decisiones para invertir tanto en la compra de nuevos equipos de medición y adquirir en forma definitiva una plataforma de Gestión Energética, incorporando los sistemas de agua y gas en su gestión. A Julio de 2018 se tiene un total de 70 equipos de medición eléctrica interconectados para monitoreo, supervisión y control energético a través de la nueva plataforma, la cual se encuentra operando en marcha blanca y que será puesta en forma definitiva a fines de Julio.
Se espera lograr un ahorro aproximado a un 20% sólo por gestión de la demanda en horas de punta. Estos montos pueden aumentar si se coordinan adecuadamente los consumos de cada edificio a modo de reducir las coincidencias de demandas en las edificaciones conectadas a un mismo empalme.

5 Conclusiones

Desde el año 2007 como parte su responsabilidad la Universidad de Concepción ha establecido una política energética conducente a optimizar el uso de las energías al interior del campus universitario.
La implementación de nuevas tecnologías en los sistemas de iluminación del edificio de Biblioteca Central, logran una reducción del 60%, equivalentes a un ahorro de €100.803 anuales.
El recambio tecnológico y la incorporación de plataforma de telegestión en los sistemas de alumbrado público, generaron un ahorro de €64.319 anuales equivalentes a un 65% del consumo inicial y posiciona a la Universidad de Concepción como el primer campus universitario a nivel mundial con un sistema de telegestión en alumbrado público.
Los proyectos de recambio tecnológicos se pagan en modalidad contra-ahorros y por lo tanto la inversión inicial de la Universidad fue de cero.

Los resultados obtenidos a partir de la plataforma de gestión energética piloto facilitada por Schneider Electric, permitió respaldar la toma de decisiones para la adquisición definitiva de una plataforma para monitoreo, supervisión y control de la energía en el campus universitario.

La Universidad de Concepción ha reducido sus emisiones anuales en aproximadamente 360 toneladas de CO_2 equivalente.

En concordancia con su política energética, la Universidad de Concepción tiene proyectado aumentar el recambio tecnológico en cada una de sus reparticiones. En la actualidad se están evaluando diversos proyectos de automatización, dentro de los cuales se pueden mencionar la automatización de gestión de alumbrado público, con el fin de que el sistema se autoregule en función de la variación de flujo vehicular y peatonal; implementación de un sistema de gestión para evacuar reportes de diagnóstico, identificación de oportunidades de mejora y propuesta de soluciones a partir del reconocimiento de perfiles de consumos de cada una de las edificaciones monitoreadas por plataforma de monitoreo. Finalmente, se tiene considerado presentar un proyecto nacional para convertir al campus de la Universidad en u Smart Campus que involucre la presencia de diversas fuentes de generación renovables, sistemas de automatización para riego de áreas verdes, control de la demanda, gestión energética (agua, electricidad, gas).

Referencias

1. Revista Electro Industria, Noviembre 2012. http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=1960
2. Diario La Tercera del 2 de noviembre del 2017. http://www2.latercera.com/noticia/gobierno-adjudica-licitacion-suministro-electrico-precio-minimo-historico/
3. Energía 2050. Política Energética de Chile. Segunda Edición. Ministerio de Energía http://www.energia2050.cl/wp-content/uploads/2017/12/Politica-Energetica-Nacional.pdf.
4. Diario La Tercera, 17 de mayo 2011. Cientos de chilenos marcharon hoy en protesta por proyecto Hidro-Aysen. http://www2.latercera.com/noticia/cientos-de-chilenos-marcharon-hoy-en-protesta-por-proyecto-hidroaysen/
5. Radio Cooperativa. Biobío Genera: Protesta por central "El Campesino" son por desinformación. 9 de agosto 2016 http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=1960
6. Informe de Memoria de Título Para obtener el Título de Ingeniero Civil Eléctrico, Universidad de Concepción, Septiembre 2014. Evaluación Técnico-Económico de Implementación de ERNC en Biblioteca Central Luis David Cruz Ocampo, basado en la Ley N°20.751. Francisco MARQUEZ ALARCÓN
7. Fotografía Vista General del Campus Concepción. Extraída desde Plataforma arquitectura. https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-45148/edificio-facultad-de-quimica-udec-reconstruccion-o-falso-historico
8. Informe Taller de Proyectos Eléctricos II. Julio 2009. Evaluación Técnico-Económico Recambio Tecnológico Biblioteca Central. N. BURDILES, H. BURGOS, A.DIAZ, P. MUÑOZ. Docente Luis GARCÍA SANTANDER
9. Eficiencia Energética Aplicaciones Exitosas en Universidad de Concepción, Luis GARCÍA SANTANDER. Revista Celulosa y El Papel, Volumen 33/N°3 ISSN 0716-2308, pág. 26-29

10. Informe Taller de Proyectos Eléctricos II. Julio 2009. Evaluación Técnico-Económico Recambio Tecnológico Sistema de Alumbrado Público Campus Concepción. B.BRAVO. Docente Luis GARCÍA SANTANDER
11. Informe de Memoria de Título Para obtener el Título de Ingeniero Civil Eléctrico, Universidad de Concepción, Noviembre 2014. Sistema de Monitoreo de Variables Eléctricas en Universidad de Concepción, Campus Concepción. Pablo SANTIBAÑEZ NEUMANN
12. Plataforma de Telegestión Sistema de Alumbrado Público Universidad de Concepción. Sitio con acceso protegido. https://lumeniq.ledroadwaylighting.com/reports/
13. Revista Panorama UdeC. Mayo 2017. N°726. Página 7.
14. Seminario Diseño Sustentable De Edificación. Exposición Dr. Luis GARCIA SANTANDER. Universidad de Concepción, Concepción 15 marzo 2017
15. Charla Iluminación y Eficiencia Energética. Exposición Dr. Luis GARCIA SANTANDER. Universidad de La Frontera, Temuco 8 junio 2017
16. http://greenmetric.ui.ac.id/what-is-greenmetric/
17. Presentación agencia chilena de eficiencia energética. Los campus de Chile se suman al desafio por la eficiencia energética. Viernes 30 de Agosto de 2013. Natalia ARANCIBIA, Subdirectora ACEE. www.acee.cl
18. https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/3726/S2007033_es.pdf;jsessionid=1A47E23F7C86CD6E9EBB028D609C233A?sequence=1
19. An integrated IoT architecture for smart metering. J Lloret, J Tomas, A Canovas, L Parra. IEEE Communications Magazine 54 (12), 50-57. Disponible en https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7786110
20. A survey on electric power demand forecasting: future trends in smart grids, microgrids and smart buildings. L Hernandez, C Baladron, JM Aguiar, B Carro, AJ Sanchez-Esguevillas, ...IEEE Communications Surveys & Tutorials 16 (3), 1460-1495. Disponible en https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6803101

Propuesta de Sistema de Gestión para Recolección de Residuos Urbanos de Ciudades Inteligentes

Diego Godoy, Eduardo Sosa, Juan Benítez, Hernan Bareiro, Fabian Favret, Edgardo Belloni

Centro de Investigación en Tecnología de la Información y Comunicaciones
Departamento de Ingeniería y Ciencias de la Producción
Universidad Gastón Dachary
Av. López y Planes 6519- Posadas, Misiones, Argentina. Teléfono: +54-376-4438677

{diegodoy, eduardo.sosa, juan.benitez, hbareiro, efabianfavret}@citic.ugd.edu.ar
ebelloni@ugd.edu.ar

Abstract. Se presenta una propuesta tecnológica, la que utilizando un prototipo de software y una red de sensores inalámbricos, permita determinar, aquellos contenedores de residuos urbanos que ameriten ser recogidos; y en base a esta información, calcular una ruta óptima de recolección. El diseño de la solución consta de tres capas: infraestructura, procesamiento y visualización. La capa de infraestructura se compone de una serie de nodos sensores ubicados dentro de los contenedores. Los nodos capturan los eventos del interior del contenedor y posteriormente envían tramas con esta información a una estación base. La capa de procesamiento, analiza y procesa las tramas recibidas y calcula una ruta óptima de recolección. Para visualizar los resultados se utiliza una interfaz web para brindar información a los usuarios sobre la ubicación de los contenedores a recoger en la próxima recorrida. Se presentan pruebas realizadas en una ciudad de tamaño promedio.

Keywords: Ciudades Inteligentes, Redes de Sensores Inalámbricos, Recolección de residuos urbanos.

1 Introducción

"*La ciudad ha sido convertida por el capital en el lugar donde se aglomera la producción, se congestiona el consumo, se hacina la población y se degrada la energía. Los procesos urbanos se alimentan de la sobreexplotación de los recursos naturales, la desestructuración del entorno ecológico, el desecamiento de los mantos freáticos, el succionamiento de los recursos hídricos, la saturación del aire y la acumulación de basura*" (Leff, 2000).

Del hecho urbano como generador de necesidades (estilos de vida urbana) se ha pasado a un proceso acumulador de irracionalidades. Latinoamérica alberga cerca de 650 millones de personas, alrededor de 1 de cada 10 habitantes del planeta, que hoy cuenta con 7 mil millones de habitantes. Se espera que para dentro de una generación seamos 9 mil millones. Estos altos niveles de población sin embargo, son muy recientes ya que hasta hace menos de trescientos años la población total de la Tierra era de apenas mil millones de personas, de los cuales solo 10 millones vivían en nuestra región.

La ciudad está destinada a convertirse en el entorno en el que el papel de la tecnología y la innovación se hará más patente en favor de la calidad de vida, la gestión eficiente de recursos y, por ende, la sustentabilidad. Las nuevas ciudades mejorarán sus actividades más comunes, a la vez que aparecerán nuevos servicios cada vez más centrados en el ciudadano.

Una ciudad inteligente es aquella que hace el mejor uso de la información y de las herramientas tecnológicas existentes para maximizar el bienestar de sus habitantes y visitantes, abordando de forma integral sus principales retos de gestión a la vez que optimiza el uso de los recursos disponibles. Con el uso inteligente de la tecnología y la innovación se puede incrementar la eficacia, competitividad y atractividad de la ciudad y mejorar su sostenibilidad medioambiental. Por tanto, las iniciativas smart no solo mejoran la calidad de vida de los ciudadanos de hoy, sino también de los ciudadanos de las próximas generaciones.

El rápido desarrollo de las tecnologías de la información y las comunicaciones (TICs), el abaratamiento de equipos y servicios de telecomunicaciones, y su disponibilidad, hace pensar que la aplicación de las mismas han de proveer beneficios cada vez mayores a los espacios urbanos. Es por ello que se han renombrado a las Redes de Sensores Inalámbricos (WSN) como Internet de las Cosas (IoT), que consiste en la integración de sensores y dispositivos en objetos cotidianos que quedan conectados a Internet a través de redes fijas e inalámbricas (Bankinter, 2011) .

Además ha cobrado auge el termino de "*Ciudad inteligente como la visión holística de una ciudad que aplica las Tecnologías de la Información y la comunicación (TIC) para la mejora de la calidad de vida y accesibilidad de sus habitantes y asegura un desarrollo sostenible económico, social y ambiental en mejora permanente*" (Grupo Normalización 178 – Asociación Española de Normalización, 2016).

En Argentina, no existe un proyecto integrador de las experiencias sobre el tema, como lo es el ejemplo español con la Red Española de Ciudades Inteligentes (Red Española de Ciudades Inteligentes, 2017), donde los alcaldes de las diferentes ciudades españolas han convenido en aunar esfuerzos en la ruta hacia un objetivo común.

Sin embargo en este trabajo se presenta una propuesta para la gestión de uno de los servicios públicos indispensables en toda ciudad inteligente como lo es la recolección de residuos, cuya esencia es retirar los residuos generados por la comunidad y gestionarlos de manera adecuada para evitar perjuicios a la salud y el ambiente.

La ciudad de Posadas, Misiones, posee actualmente una población de 324.756 habitantes (Indec, 2010) por tanto puede ser considerada una ciudad con una población importante, que genera una gran cantidad de residuos urbanos.

Para llevar a cabo la recolección de residuos, la municipalidad de esta ciudad, cuenta con camiones acondicionados, contenedores de distintos tipos y capacidades, y personal calificado para realizar la tarea.

Las rutas de recolección preestablecidas cubren la totalidad de las zonas de la ciudad. Dichas rutas poseen distintas frecuencias de recolección. En zonas céntricas por ejemplo la frecuencia es de dos veces por día, en zonas cercanas al centro la recolección se realiza una vez al día, mientras que en las zonas más alejadas se realiza tres veces por semana.

En el trayecto mencionado, los recolectores pueden encontrarse con contenedores de niveles variables de desechos, sin embargo, deben revisar cada uno de los mismos, produciendo pérdida de tiempo y desgaste físico. Por otro lado, si en una ruta, los primeros contenedores que se recolectan están al nivel máximo de llenado, la capacidad del camión se completará antes de finalizar el recorrido, provocando mayor cantidad de viajes, mayor gasto en combustible y por lo tanto mayores emisiones de CO2. Siendo este último un elemento considerado causante directo del efecto invernadero. (Schmidt, 2012)

Tanto la capacidad de los camiones, las distancias del recorrido, el crecimiento industrial y urbano, sumado a un posible mal diseño de rutas, generan un servicio ineficiente de recolección de residuos.

Ante esta situación, es sumamente interesante contar con un sistema basado en un nuevo paradigma que consiste en utilizar Redes de Sensores Inalámbricos para la detección de los contenedores de residuos que merecen ser recogidos y calcular la ruta óptima para llegar a cada uno de ellos, lo cual podría maximizar el rendimiento laboral, energético y ecológico.

En (Hannan, 2015) se presenta una revisión crítica de las tecnologías existentes y su uso en los sistemas de manejo de residuos sólidos estudiando sus problemas y desafíos. Propone dividir a las tenologías en cuatro categorías: a) espaciales, b) de identificación, c) de adquisición de datos y d) de comunicación de datos. El presente trabajo se basa en las primeras tres categorías, mientras que la cuarta es normalmente utilizada por casi todos los sistemas.

Borozdukhin propone una solución al problema de optimización de eliminación de basura en las grandes ciudades(A. Borozdukhin, 2016). El autor describe una arquitectura para encontrar una ruta dinámica de tiempo óptimo para camiones de basura dentro del proyecto "Smart Clean City". Propone asimismo, un modelo matemático formal para generar una ruta óptima dinámica y el criterio de optimización para la recolección óptima en el tiempo de todos los contenedores de basura.

Vu et al. presenta un novedoso método de gestión inteligente de basura de manera limpia y a un costo razonable (D. D. Vu and G. Kaddoum, 2017). En este enfoque, los sensores detectan, miden y transmiten datos de volumen de llenado Con ésta información, incluida la geolocalización del contenedor y el número de serie, se procesan mediante regresión, clasificación y teoría de grafos. A partir de allí, se proponen un nuevo método para administrar de forma dinámica y eficiente la recolección de basura al predecir el estado de los desechos, clasificar la ubicación y monitorear la cantidad de los mismos. Con estos datos procesados, se realiza la recomendación de la ruta para gestionar el recorrido del camión de basura de manera eficiente.

Nuestro trabajo está estructurado de la siguiente manera: en la sección 2 se dará una breve descripción de la metodología y en la sección 3 se darán los detalles de construcción de la solución, dispositivos de hardware y herramientas de software utilizadas. Seguidamente en la sección 4, se presentarán las pruebas en laboratorio, pruebas en campo y los resultados obtenidos. Para finalizar se presentarán las conclusiones y trabajos futuros respectivamente.

2 Metodología

Se realizó una entrevista al Encargado de la Dirección de Servicios Públicos de la Municipalidad de la ciudad de Posadas. En la misma se analizaron diferentes temas relacionados al servicio de recolección de residuos urbanos, como ser:

- Recursos utilizados para llevar a cabo este servicio (camiones y contenedores de distintos tipos y capacidades).
- Frecuencia de recolección en zonas céntricas de la ciudad, en zonas cercanas al centro y en zonas más alejadas.
- Problemática de la recolección de residuos, en donde se destacó el costo (en dinero y tiempo) que significa realizar el recorrido de todos los contenedores de la ciudad, tengan o no residuos.

Esta entrevista permitió obtener un conocimiento sobre el funcionamiento actual del servicio de recolección de residuos urbanos y en base a esto se propuso un prototipo de software que permita realizar la monitorización del estado de contenedores de residuos urbanos, a través de una Red de Sensores Inalámbricos.

3 Arquitectura de la solución propuesta

El desarrollo tecnológico propuesto utilizará sensores de movimiento y sensores de luz para determinar el nivel de llenado de los contenedores. Luego se transmitirá la información generada por estos sensores hacia una estación central, por medio de la infraestructura provista por la red de sensores inalámbrica.

En la estación base se evaluará la información recibida y se actualizarán los datos de llenado de los contenedores (cantidad de movimientos e iluminancia). Posteriormente se realizará el cálculo de ruta óptima, seleccionado aquellos contenedores que ameritan ser recogidos.

Por último, se visualizará en un mapa la ruta óptima, tomando como referencia la posición geo-referencial de los contenedores (latitud-longitud), indicando el punto de inicio, los contenedores a recoger y el fin del recorrido. En la Figura 1 se puede apreciar la arquitectura del sistema.



Figura 1. Arquitectura del Sistema Propuesto

El detalle de la funcionalidad de cada capa se describe a continuación.

3.1 Capa de infraestructura

La capa de infraestructura se compone de una serie de nodos sensores ubicados dentro de los contenedores de residuos urbanos y de un nodo gateway.

En esta capa, se encuentra los siguientes Subsistemas:

- Subsistema de detección de movimientos del nodo PIR: Los nodos con sensores PIR, de aquí en adelante: nodo sensor pir, capturan los movimientos que ocurren en el interior de los contenedores (causados por la introducción de objetos). Luego se generan tramas de datos en las que incluyen, la dirección MAC del nodo y el valor actual del contador de movimientos.

- Subsistema de detección de luz del nodo iluminancia: Los nodos con sensores de luz, de aquí en adelante: nodo sensor iluminancia, capturan el valor de iluminancia en el interior del contenedor. Posteriormente se generan tramas de datos en la que se envía, la dirección MAC del nodo y el valor de iluminancia detectado.Las tramas generadas son enviadas hacia el nodo gateway inalámbricamente vía radio.
- Subsistema sumidero de datos: El nodo gateway, recibe las tramas provenientes de los nodos que se encuentran dentro del radio de cobertura, y posteriormente las envía a la estación base. La comunicación entre el nodo gateway y la estación base se realiza mediante un puerto serie. Para esta arquitectura, se ha utilizado un puerto USB.

3.2 Capa de procesamiento

La capa de procesamiento, se compone de una notebook que actúa como estación base.

En esta capa se encuentran los siguientes Subsistemas:

- El Subsistema de captura y almacenamiento de datos de la estación base, analiza la trama recibida para determinar si es válida. Si esto se cumple, se examina la sección de datos (payload). Si la trama proviene de un nodo sensor pir, se extrae de la trama la dirección MAC y el contador actual. Luego se actualiza el contador asociado al contenedor y se almacena la trama leída en la base de datos. Si la trama proviene de un nodo sensor iluminancia, se extrae de la trama la dirección MAC y el valor de iluminancia recibida. Posteriormente se actualiza en la base de datos, el valor de iluminancia del contenedor asociado.
- Subsistema de cálculo de ruta óptima: En ésta capa también se realiza el cálculo de ruta óptima, seleccionando de la base de datos, aquellos contenedores cuyo contador y valor de iluminancia superan un valor predeterminado. El calculo de la ruta optima se realiza utilizando un algorimo bien conocido de búsqueda huristica en arboles denominado A* (A estrella) (P. E. Hart, 1968) para determinar el orden en que se recogerán los contenedores. El algoritmo es una combinación entre búsquedas del tipo primero en anchura con primero en profundidad. De este modo, se cambia de camino de búsqueda cada vez que existen nodos más prometedores.

3.3 Capa de visualización

La última capa de la arquitectura es la de visualización, la cual utiliza una interfaz web para brindar información a los usuarios, sobre la ubicación de los contenedores a recoger.

En esta capa se encuentra el Subsistema de visualización de ruta.

3.4 Componentes de hardware utilizados

Los nodos sensores utilizados en la capa de infraestructura son de la marca iSense, y están fabricados por la empresa Coalesenses (GmbH, 2015).

Se decidió utilizar el módulo de seguridad y el módulo ambiental, al considerar que son los que mejor se adaptan para resolver la problemática planteada. El módulo de seguridad dispone de un sensor pasivo infrarrojo (PIR) y un acelerómetro, mientras que el módulo ambiental dispone de un sensor de luz y un sensor de temperatura.

El hardware de la plataforma iSense presenta un esquema modular.

El "nodo sensor PIR", está formado por el módulo principal (core module), el módulo de seguridad, y el módulo de energía (Figura 2).



Figura 2. Nodo sensor PIR.

El "nodo sensor iluminancia", está formado por el módulo principal (core module), el módulo ambiental y el módulo de energía.

3.5 Herramientas de software utilizadas

El hardware iSense utilizado en la capa de infraestructura, proporciona un conjunto de herramientas de software que incluyen: Sistema operativo, bibliotecas y códigos fuentes desarrollados en lenguaje C++.

Este conjunto de herramientas provee un variado número de servicios y protocolos listos para usar, lo cual permite el desarrollo rápido de aplicaciones pequeñas pero complejas.

Entre las herramientas de software utilizadas se encuentran: herramientas de compilación (make, cmake, g++), compilador ba-elf (para micro controladores Jennic), plataforma de desarrollo Eclipse, firmware iSense (Biblioteca para desarrollo iSense), iShell (herramienta para análisis, programación y operación sobre nodos).

4 Resultados y Análisis

En esta sección se describen las pruebas realizadas en laboratorio y en campo.

4.1 Prueba en Laboratorio

Para evaluar el nivel de llenado, se llevó a cabo una prueba de laboratorio, en la que se utilizó una caja de cartón cuyas dimensiones fueron: paredes laterales de 44 cm de ancho, paredes frontal y trasera de 47 cm de ancho y profundidad o alto de 35 cm. En la Figura 3 se puede ver una imagen de la caja y componentes utilizados, y en la Figura 4 una imagen del interior de la caja con el nodo dentro.



Figura 3. Nodo sensor PIR, nodo gateway, estación base y caja para pruebas

Antes de iniciar las pruebas, se ubicó el nodo en la parte superior de una de las paredes laterales de la caja y con el sensor pir apuntando hacia el fondo, a 45º de la pared lateral, para que el área de detección cubra la mayor superficie posible.

Una vez ubicado el nodo sensor, se encendió el mismo y se esperó un minuto para que el sensor se inicialice y reconozca la temperatura ambiente. Luego se inició la aplicación de "captura y almacenamiento" en la estación base y se comenzaron a introducir objetos en la caja para verificar si el sensor los detectaba.



Figura 4. Ubicación del nodo sensor PIR en la caja

Por cada trama recibida, se verificó que la misma sea válida. Esta validación se llevó a cabo, evaluando la longitud de la trama recibida y verificando si los caracteres de inicio y fin de trama coincidían con los definidos en la capa de infraestructura. Se considera válida una trama si inicia con los caracteres 1002 y si termina con los caracteres 1003 y si la longitud es de 16 caracteres.

Finalizadas las pruebas se obtuvieron los siguientes resultados:

- Se recibieron algunas tramas incompletas o defectuosas que no pasaron la validación.
- No se detectaron todos los objetos que pasaron delante del sensor. Esto pudo ocurrir por dos motivos:
- El objeto pasó delante del sensor fuera del lapso de monitoreo.
- El objeto que se introdujo no irradió el calor suficiente para que el sensor lo detecte.
- Se comprobó que si el sensor se encuentra obstruido por algún objeto, no detecta ningún movimiento.

4.2 Prueba en Campo

Las pruebas de campo se realizaron en el barrio Villa Sarita de la ciudad de Posadas. Se eligió este barrio por estar cercano al centro y por utilizar los mismos contenedores de residuos del centro de la ciudad.

Se consideró una ruta constituida por 23 contenedores, de los cuales se seleccionaron cuatro contenedores que se encontraban próximos entre sí, tal como se indica en la Figura 5.

Para cada uno de los contenedores de la ruta, se ingresó en el software que se ejecuta en la capa de procesamiento, las direcciones de latitud y longitud.



Figura 5. Ubicación en el mapa de los contenedores.

Los contenedores utilizados en las pruebas (Figura 6), fabricados de polietileno de alta densidad de formulación especial, con una densidad de 0,95 gr./cm3.



Figura 6. Contenedor de residuos utilizado en las pruebas de campo.

Los elementos utilizados en estas pruebas fueron: un nodo sensor PIR, un nodo gateway y una notebook que funcionó como estación base. Las pruebas se realizaron de un contenedor por vez. Antes de iniciar las mismas se realizaron los siguientes pasos:

- Se verificó que el contenedor esté vacío.
- Se ubicó el nodo sensor PIR en uno de los extremos del contenedor, con el sensor apuntando hacia abajo, para que el mismo no detecte movimientos que ocurrían en el exterior del contenedor.
- En el software del nodo sensor PIR, se estableció un intervalo de silencio de 2 segundos y un temporizador para informar el valor del contador cada 20 segundos.

Finalizado los pasos anteriores, se encendió el nodo sensor pir y se esperó un minuto para que el mismo reconozca la temperatura del interior del contenedor. Durante este tiempo, no se realizó ningún movimiento delante del sensor. Luego se ejecutó la aplicación de captura y almacenamiento en la estación base.

Posteriormente, se comenzaron a introducir bolsas de residuos en distintos extremos del contenedor (Figura 7), para verificar si el sensor los detectaba, controlando cada 20 segundos la interfaz a fin de constatar que el contador se incremente.

Después de introducir varias bolsas de se constató lo siguiente:

Se recibieron algunas tramas incompletas o defectuosas que no pasaron la validación.

El contador asociado al contenedor tenía un valor superior a la cantidad de objetos introducidos. Esto se produjo porque el nodo sensor PIR captó movimientos ajenos al interior del contenedor.



Figura 7. Inserción de residuos en el contenedor.

Esta secuencia de pruebas se repitió en los tres contenedores restantes. Para simular distintos nodos, se asignó al nodo sensor PIR, diferentes direcciones MAC (d1, d2, d3, d4). En la Figura 8 se puede visualizar la pantalla de captura de tramas al finalizar las pruebas sobre los cuatro contenedores.

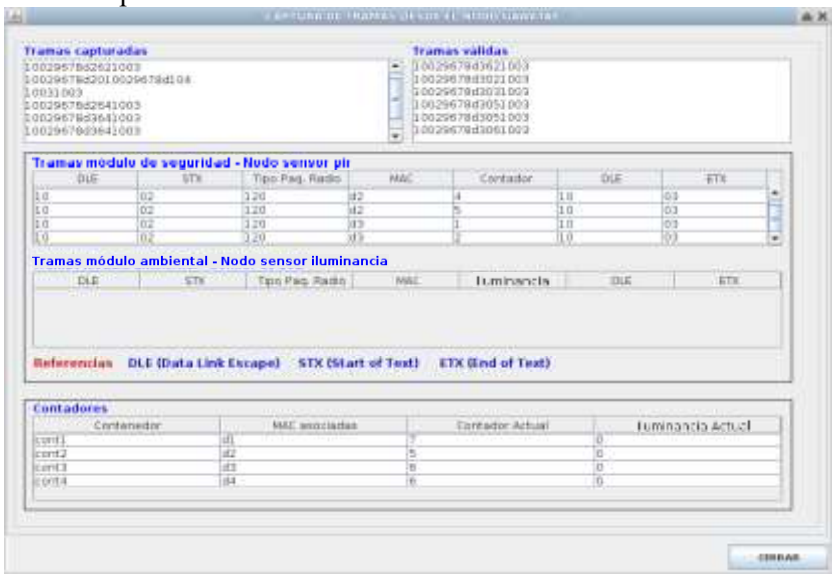


Figura 8. Captura de tramas recibidas inicialmente.

4.3 Resultados de la prueba

Al concluir las pruebas de detección de objetos, se constató que el gateway recibía tramas de datos (válidas e inválidas), únicamente cuando tenía una visión directa con el nodo sensor PIR a unos 70 metros de distancia aproximadamente. En la Tabla 1 se resumen las tramas recibidas en las pruebas realizadas a cada contenedor.

Tabla 1 . Resultados del escenario

Contenedor	Objetos introducidos en el contenedor	Tramas validas	Tramas Inválidas			Distancia objeto-sensor	Distancia gateway	% Fallos
			Defectuosas	Incompletas	No detectada			
1	15	12	1	2	0	<=126 cm	30 m	20%
2	20	14	2	3	1	<=126 cm	40 m	30%
3	18	10	4	2	2	<=126 cm	60 m	44%
4	15	4	4	6	1	<=126 cm	70 m	73%

Por este motivo el nodo gateway se ubicó en la intersección de las calles Nicomedes Castro y Moritán como se puede ver en la Figura 9.



Figura 9. Ubicación en el mapa del gateway.

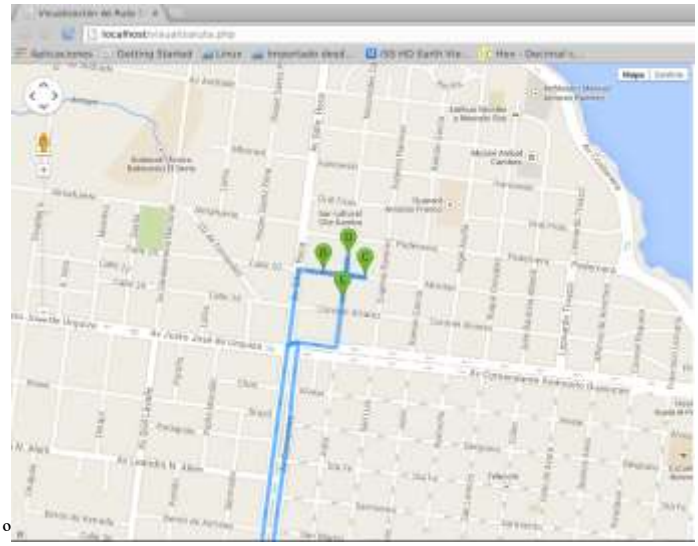
Por último, se ejecutó el módulo de cálculo de ruta, se verificó el resultado del algoritmo A * en base a las distancias indicadas en la grilla de contenedores a recorrer y se visualizó la ruta óptima en la interfaz web.

En la Figura 10 se visualiza el mapa con la ruta completa y en la Figura 11 se puede ver la porción del mapa (con un nivel de acercamiento superior), donde se indican los contenedores a recorrer. El punto A corresponde al origen del recorrido (Dirección

de Servicios Públicos). Los puntos B, C, D y E corresponden a los contenedores 1, 2, 3 y 4. El punto F corresponde al final del recorrido.



Figura 10. Visualización de ruta óptima.



o

Figura 11. Contenedores a recoger.

5 Conclusión

Se logró probar bajo las condiciones de campo experimentales que es posible la comunicación entre un nodo sensor y un nodo gateway, utilizando el estándar IEEE 802.15.4.

Además, se concluyó que si bien el nodo sensor PIR permite detectar los objetos que ingresan al contenedor, no sirve para determinar un nivel de llenado por sus características de fábrica.

Por último, se observó que al trabajar en un entorno inalámbrico, se pierden muchas tramas debido a interferencias y ruidos presentes en el ambiente. Por esta razón, se considera fundamental que un sistema que basa su comunicación principalmente en una infraestructura de red de sensores inalámbricos, valide las tramas recibidas, a fin de trabajar con datos correctos.

Como trabajos futuros se plantea adicionar otro tipo de sensores a fin de mejorar la estimación de esta medida, necesaria para llevar a cabo el trabajo. Se prevé también realizar las interfaces web necesarias para registrar contenedores y utilizar otros algoritmos de búsqueda más eficientes para mejorar la estimación del camino óptimo de recolección de contenedores.

Se prevé también la realización de simulaciones en espacios geográficos más amplios involucrando a más sensores.

Cabe destacar que el caso de estudio analizado pertenece a una ciudad que no cuenta actualmente con una infraestructura de red , por lo que sería prometedor integrar nuestra propuesta con otras plataformas para IoT como LORA, LoRaWAN (LoRa Alliance, 2018), Sigfox (Sigfox, 2018) o UBIDots (UBIDots, 2018).

6 Bibliografia

A. Borozdukhin, O. D. (2016). Approach to the garbage collection in the “Smart Clean City” project. *2016 4th IEEE International Colloquium on Information Science and Technology (CiSt).* Tangier: IEEExplorer.

Ariel. (2011). *Smart Cities: Un primer paso hacia la Internet de las cosas.* Barcelona: Fundación Telefónica.

Bankinter, F. d. (2011). *El internet de las cosas. En un mundo conectado de objetos inteligentes.*

D. D. Vu and G. Kaddoum. (2017). A waste city management system for smart cities applications. *Advances in Wireless and Optical Communications (RTUWO).* Riga: IEEExplore.

GmbH, C. (2015). Retrieved from Bridging the gap between virtuality and reality: http://www.coalesenses.com

Grupo Normalización 178 – Asociación Española de Normalización. (2016). *Ciudades Inteligentes* . Madrid.

Hannan, M. A. (2015). A review on technologies and their usage in solid waste monitoring and management systems: Issues and challenges. *Waste management* . (New York, N.Y.).

Indec. (2010). Retrieved from Censo 2010: http://www.sig.indec.gov.ar/censo2010/

Leff, E. (2000). *Pensar la complejidad ambiental.* México: Siglo Veintiuno Editores/UNAM/UNEP.

LoRa Alliance. (2018). *LoRa Alliance*. Retrieved from http://lora-alliance.org/

Mark Weiser. (1999). Retrieved from The Computer for the 21st Century: http://wiki.daimi.au.dk/pca/_files/weiser-orig.pdf

P. E. Hart, N. J. (1968). A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths," . *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics, vol. 4, no. 2*, pp. 100-107.

Red Española de Ciudades Inteligentes. (2017). Retrieved from Red Española de Ciudades Inteligentes: http://www.redciudadesinteligentes.es/

Schmidt, G. A. (2012). Attribution of the present day total greenhouse effect. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*.

Sigfox. (2018, sep 04). *Sigfox - The Global Communications Service Provider for the IoT*. Retrieved from https://www.sigfox.com/en

UBIDots. (2018). *UBIDots*. Retrieved from https://ubidots.com/

Asignación de responsabilidad de las cargas en las emisiones de CO_2 de centrales térmicas mediante el Método Aumann-Shapley

Carlos Castillo C.[1], Yuri Rodríguez M.[2], Jaime Luyo K.[1]

[1] Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Nacional de Ingeniería, Rímac, Lima, Perú
[2] Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, Brasil
castillocorreac@gmail.com

Abstract. En este artículo se desarrolló una metodología basada en teoría de circuitos y el método de Aumann-Shapley para calcular la responsabilidad de las cargas en las emisiones de CO_2 producidas indirectamente por el consumo de energía eléctrica. El método propuesto fue aplicado en dos casos: caso 1, considera un sistema hidrotérmico y caso 2, considera un sistema hidrotérmico con una central fotovoltaica. Comparando los resultados obtenidos en el caso 1 y el caso 2, se pudo calcular los beneficios medio ambientales de la incorporación de una central fotovoltaica en un sistema hidrotérmico. El método propuesto fue aplica en dos sistemas de prueba: un sistema de prueba de 5 barras y un sistema de prueba de 9 barras.

Keywords: Aumann-Shapley, emisiones de CO_2, sistema hidrotérmico.

1 Nomenclatura

Los símbolos matemáticos utilizados a lo largo de este artículo se clasifican a continuación como:

I	Corriente nodal.
Y	Matriz de admitancia nodal.
E	Tensión nodal.
$\tilde{Y}_{ij}$	Elemento (i,j) de la matriz admitancia considerando a las cargas como impedancias (Y-bus modificado).
Y_j^L	Admitancia equivalente de la carga L, conectada en la barra "j".
Y_{ij}	Elemento (i,j) de la matriz admitancia nodal (Y).
S_j^L	Potencia compleja demanda por la carga L conectada en la barra "j".
E_j	Tensión en la barra "j".
$\tilde{Z}_{ki}$	Elemento (k,i) de la matriz impedancia considerando a las cargas como impedancias (Z-bus modificado).
$\tilde{I}_i$	Corriente compleja inyectada en la barra "i".
$\tilde{R}_{ki}$	Componente real del elemento (k,i) de la matriz Z-bus modificada ($\tilde{Z}_{ki}$).

$\tilde{X}_{ki}$ Componente imaginario del elemento (k,i) de la matriz Z-bus modificada $(\tilde{Z}_{ki})$
$\tilde{I}_i^r$ Componente real de la corriente inyectada en la barra "i" $(\tilde{I}_i)$.
$\tilde{I}_i^r$ Componente imaginaria de la corriente inyectada en la barra "i" $(\tilde{I}_i)$.
P_k^L Potencia activa consumida por la carga L conectada en la barra "k".
g_k^L Componente real de la admitancia equivalente de la carga L conectada en la barra "k" (Y_k^L).
$PU_{\tilde{I}_x^r \to L_k}$ Participación unitaria de componente real de la corriente inyectada por el generador en la barra "x", en la potencia activa consumido por la carga L conectada en la barra "k".
$PU_{\tilde{I}_x^i \to L_k}$ Participación unitaria de componente imaginaria de la corriente inyectada por el generador en la barra "x", en la potencia activa consumido por la carga L conectada en la barra "k".
$PT_{\tilde{I}_x \to L_k}$ Participación total del generador conectado en la barra "x" en la potencia activa consumida por la carga L conectada en la barra "k".
$E_{I_x \to L_k}$ Emisiones de CO_2 asignado a la carga L conectada en la barra "k", debido al consumo de potencia activa inyectada por el generado térmico conectado en la barra "x".

2 Introducción

La energía eléctrica se ha convertido en un recurso indispensable para el desarrollo económico de una sociedad moderno, siendo suministrado principalmente por centrales hidroeléctricas, centrales nucleares y centrales térmicas a base de carbón, derivados de petróleo y gas natural. Como se ha visto en los últimos años, el consumo energético tiene sus implicancia en el medio ambiente, debido a que en proceso de combustión del combustible fósil para la generación de electricidad emiten una serie de gases, como es el caso de óxidos de carbón (CO y CO_2), óxidos de azufre (SO_x) y óxidos de nitrógeno (NO_x), responsables del calentamiento global [1].

La presencia de gases de efecto invernadero en la atmosfera absorben la energía del sol causando el incremento de la temperatura del planeta. De acuerdo a las recomendaciones del IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) este incremento promedio global no debe superar los 2°C respecto a los niveles preindustriales [2]. Actualmente, el cambio climático se ha convertido en uno de los mayores desafíos para la población mundial, debido a que si no se toman las medidas preventivas adecuadas provocaría la degradación del medio ambiente y el incremento de desastres naturales, afectando a las diversas formas de vida en el planeta [3]. Una de las formas más efectivas de controlar el cambio climático es reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero. Para cumplir con este propósito, muchos países alrededor del mundo vienen incorporando en su matriz energética fuentes de energía amigables con el medio ambiente. Entre estas fuentes se encuentra la generación eólica, solar térmica, solar fotovoltaica, biomasa, geotérmica y energías marinas.

Las fuentes de energía renovables son virtualmente inagotables y pueden ser implementados cerca de los consumidores (conectados a la red), o en forma aislada, resolviendo el problema local de energía. A pesar de los diferentes beneficios mencionados

anteriormente, actualmente el uso de energías renovables solo representa el 14% de la demanda mundial de electricidad (incluyendo centrales hidroeléctricas grandes, medianas y pequeñas) [4], por lo que el suministro mundial de energía eléctrica sigue siendo predominantemente térmico [5]. Es por ello que en este artículo se mostrará los beneficios medioambientales de incorporar generación fotovoltaica en un sistema hidrotérmico y a la vez se calculará las emisiones indirectas que genera una determinada carga por el consumo de una cierta cantidad de energía eléctrica.

En la literatura científica existen trabajos relacionados a la asignación de emisiones de CO_2 a nivel de país y región [2], a nivel del sector transporte [6], a nivel de producto terminado en las refinerías de petróleo [7] y a nivel de generadores de electricidad a través del despacho económico ambiental [8]. Sin embargo, no existen trabajos en la literatura científica que consideren la responsabilidad compartida entre generadores térmicos y consumidores de electricidad, en las emisiones de CO_2 por las centrales termoeléctricas. Es por ello que en este artículo se propone una metodología que combina la Teoría de Circuitos y el Método de Aumann-Shapley para calcular la responsabilidad de cada carga en las emisiones de CO_2 de un sistema hidrotérmico. El método propuesto fue aplicado en dos casos: caso 1, en un sistema hidrotérmico y caso 2, en un sistema hidrotérmico con una central fotovoltaica. Las diferencias en las asignaciones para cada carga entre el caso 1 y el caso 2, representan las reducciones en las emisiones de CO_2 de un sistema hidrotérmico debido a la incorporación de una central fotovoltaica.

Utilizar el método Aumann-Shapley para la asignación de emisiones de CO_2 entre cargas puede justificarse por que satisface los axiomas fundamentales de una asignación justa y transparente [9]. Los resultados podrían ser utilizados como un mecanismo de control en las emisiones de CO_2 entre los agentes del mercado eléctrico, premiando a aquellos agentes que no sobrepasen los límites de emisiones establecidos y castigando a aquellos que los sobrepasen, con la finalidad de generar una conciencia ambiental.

Este artículo se organiza de la siguiente manera: Sección 3: se desarrollará el formalismo matemático del modelo propuesto. Sección 4, se presentarán y discutirán los resultados numéricos obtenidos mediante el modelo propuesto aplicado en dos sistemas de prueba: un sistema de prueba de 5 barras y un sistema de prueba de 9 barras. Finalmente, en la Sección 5, se presentarán las conclusiones.

3 Metodología

El método propuesto es utilizado *ex post* de la operación del mercado eléctrico, es decir, después de realizado el despacho de carga. Mediante el despacho de carga se conoce los precios en cada barra del sistema y el mix de centrales de generación eléctrica que entrarán en operación para cubrir la demanda. Conociendo que centrales de generación eléctrica están disponibles en el sistema y la posición de las cargas conectadas en las diferentes barras del sistema, se pueden obtener las soluciones del flujo de potencia. Los resultados del flujo de potencia permiten conocer el estado de operación del sistema, lo cual puede ser utilizado como datos de entrada para el modelo propuesto,

permitiendo calcular la responsabilidad que tiene cada carga en las emisiones CO_2 del sistema.

El método propuesto utiliza los resultados del flujo de potencia como datos de entrada para calcular la responsabilidad de cada carga en las emisiones de CO_2 en un sistema hidrotérmico.

Aplicando teoría de circuitos en sistema de "n" barras se obtiene.

$$I = YE \tag{1}$$

Siendo *E*, vector de tensión nodal, *Y*, matriz admitancia nodal e *I*, vector de inyecciones de corrientes nodales.

Para calcular la participación de cada generador en la potencia activa consumida por cada carga, en el método propuesto, los generadores son modelados como fuentes de corriente y las cargas como admitancias constantes. Las admitancias equivalentes de las cargas son incorporadas a los elementos de la diagonal de la matriz *Y*. Obteniéndose la matriz Y-bus modificada ($\tilde{Y}$). El elemento (*i*,*j*) de la matriz Y-bus modificada se obtiene a partir del elemento *(i*,*j*) de matriz *Y*, como se puede ver en la ecuación (2).

$$\tilde{Y}_{ij} = \begin{cases} Y_{ij} + Y_j^L & \text{para} \quad i = j \\ Y_{ij} & \text{para} \quad i \neq j \end{cases} \tag{2}$$

La admitancia equivalente de la carga *L* conectada a la barra *j*, se puede calcular mediante:

$$Y_j^L = \frac{1}{E_j}\left(\frac{S_j^L}{E_j}\right)^* \tag{3}$$

Siendo E_j *y* S_j^L, la tensión y la potencia aparente consumida por la carga *L* conectada a la barra *j*. Ambos valores son obtenidos a partir del flujo de potencia.

Invirtiendo la matriz admitancia modificada mostrada en la ecuación (2), se obtiene la matriz de impedancia modificada $\tilde{\mathrm{Z}}$.

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ \vdots \\ E_k \\ \vdots \\ E_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{Z}_{11} & \cdots & \tilde{Z}_{1k} & \cdots & \tilde{Z}_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{Z}_{k1} & \cdots & \tilde{Z}_{kk} & \cdots & \tilde{Z}_{kn} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{Z}_{n1} & \cdots & \tilde{Z}_{nk} & \cdots & \tilde{Z}_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{I}_1 \\ \vdots \\ \tilde{I}_k \\ \vdots \\ \tilde{I}_n \end{bmatrix} \tag{4}$$

Considerando que en la barra "*k*" se encuentra conectada la carga *L*. A partir de la ecuación (4), la tensión de dicha carga, se puede calcular como una combinación lineal de las corrientes inyectadas al sistema por los generadores.

$$E_k = \tilde{Z}_{k1}\tilde{I}_1 + \cdots + \tilde{Z}_{kk}\tilde{I}_k + \cdots + \tilde{Z}_{kn}\tilde{I}_n = \sum_{i=1}^{n} \tilde{Z}_{ki}\tilde{I}_i \tag{5}$$

Siendo, $\tilde{Z}_{ki}$, elemento (k,i) de la matriz impedancia modificada, $\tilde{I}_i$, elemento i del vector de inyección de corrientes. Por otro lado, La potencia consumida por la carga L conectada a la barra k, puede ser calculada por.

$$S_k^L = (Y_k^L)^* \, |E_k|^2 \tag{6}$$

Siendo Y_k^L admitancia de carga, E_k, tensión de la carga conectada a la barra k. Considerando $\tilde{I}_i = \tilde{I}_i^r + j\tilde{I}_i^i$ y $\tilde{Z}_{ki} = \tilde{R}_{ki} + j\tilde{X}_{ki}$, la ecuación (5) resulta.

$$E_k = \sum_{i=1}^{n} \left(\tilde{R}_{ki}\tilde{I}_i^r - \tilde{X}_{ki}\tilde{I}_i^i\right) + i * \sum_{i=1}^{n} \left(\tilde{X}_{ki}\tilde{I}_i^r + \tilde{R}_{ki}\tilde{I}_i^i\right) \tag{7}$$

Remplazando la ecuación (7) en (6) se obtiene.

$$S_k^L = (Y_k^L)^* \left[\left(\sum_{i=1}^{n} \left(\tilde{R}_{ki}\tilde{I}_i^r - \tilde{X}_{ki}\tilde{I}_i^i\right)\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^{n} \left(\tilde{X}_{ki}\tilde{I}_i^r + \tilde{R}_{ki}\tilde{I}_i^i\right)\right)^2\right] \tag{8}$$

Considerando $S_k^L = P_k^L + jQ_k^L$ y $Y_k^L = g_k^L + jb_k^L$, se puede obtener una expresión matemática para la potencia activa consumida por la carga L conectada en la barra k.

$$P_k^L = g_k^L \left[\left(\sum_{i=1}^{n} \left(\tilde{R}_{ki}\tilde{I}_i^r - \tilde{X}_{ki}\tilde{I}_i^i\right)\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^{n} \left(\tilde{X}_{ki}\tilde{I}_i^r + \tilde{R}_{ki}\tilde{I}_i^i\right)\right)^2\right] \tag{9}$$

A partir de la ecuación (9) se puede observar que la potencia activa consumida por la carga L conectada a la barra "k", está en función de las corrientes inyectadas al sistema por los generadores. Por lo tanto, se puede utilizar el método de Aumann-Shapley para determinar la responsabilidad de cada fuente de corriente en la potencia activa consumida por cada carga.

3.1 Asignación de potencia activa mediante el método de Aumann Shapley

El método consiste en dividir a cada fuente de corriente en partes infinitesimales, todas del mismo tamaño, y considerar a cada parte infinitesimal como un jugador independiente. Esto permite que el problema de asignación de potencia reactiva tenga una soluciona analítica [10].

Para un sistema formado por "n" barras, se tiene "n" jugadores ($\tilde{I}_1$, ..., $\tilde{I}_k$, ..., $\tilde{I}_n$) o "2n" jugadores, si se analiza a las fuentes de corriente en su componente real e imaginaria ($\tilde{I}_1^r$, $\tilde{I}_1^i$..., $\tilde{I}_k^r$, $\tilde{I}_k^i$, ..., $\tilde{I}_n^r$, $\tilde{I}_n^i$). Por ejemplo, si se considera la corriente inyectada por un generador en la barra "x" como $\tilde{I}_x = \tilde{I}_x^r + j\tilde{I}_x^i$. La participación unitaria de la componente real ($\tilde{I}_x^r$) en la potencia activa consumida por la carga L conectada en la barra "k" se puede calcular mediante la siguiente ecuación.

$$PU_{\tilde{I}_x^r \to L_k} = \int_0^1 \frac{\partial P_k^L(\tilde{I}t)}{\partial \tilde{I}_x^r} dt \tag{10}$$

Reemplazando el valor de P_k^L de la ecuación (9) en la ecuación (10), derivando e integrando se obtiene.

$$PU_{\tilde{I}_x^r \to L_k} = g_k^L \left[\left(\sum_{i=1}^{n} \left(\tilde{R}_{ki} \tilde{I}_i^r - \tilde{X}_{ki} \tilde{I}_i^i \right) \right) \tilde{R}_{kx} + \left(\sum_{i=1}^{n} \left(\tilde{X}_{ki} \tilde{I}_i^r + \tilde{R}_{ki} \tilde{I}_i^i \right) \right) \tilde{X}_{kx} \right] \tag{11}$$

La participación unitaria de la componente imaginaria ($\tilde{I}_x^i$), en la potencia activa consumida por la carga L conectada a la barra "k" se puede calcular mediante la siguiente ecuación.

$$PU_{\tilde{I}_x^i \to L_k} = \int_0^1 \frac{\partial P_k^L(\tilde{I}t)}{\partial \tilde{I}_x^i} dt \tag{12}$$

Reemplazando el valor de P_k^L de la ecuación (9) en la ecuación (12), derivando e integrando se obtiene.

$$PU_{\tilde{I}_x^i \to L_k} = g_k^L \left[\left(\sum_{i=1}^{n} \left(\tilde{R}_{ki} \tilde{I}_i^r - \tilde{X}_{ki} \tilde{I}_i^i \right) \right) \left(-\tilde{X}_{kx} \right) + \left(\sum_{i=1}^{n} \left(\tilde{X}_{ki} \tilde{I}_i^r + \tilde{R}_{ki} \tilde{I}_i^i \right) \right) \tilde{R}_{kx} \right] \tag{13}$$

La participación total de la corriente inyectada por el generador en la barra "x" en la potencia activa consumida por la carga L conectada en la barra "k" se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$PT_{\tilde{I}_x \to L_k} = \tilde{I}_x^r * PU_{\tilde{I}_x^r \to L_k} + \tilde{I}_x^i * PU_{\tilde{I}_x^i \to L_k} \tag{14}$$

3.2 Asignación de emisión de CO_2

Con la ecuación (14) se puede conocer que parte de la potencia inyectada por el generador conectado en la barra "x" es consumida por la carga L conectada en la barra "k", con esta información y utilizando la ecuación proporcionada en [1] se puede calcular la responsabilidad de la carga L conectado en la barra "k" en las emisiones de CO_2 del generador térmico conectado en la barra "x".

$$E_{\tilde{I}_x \to L_k} = PT_{\tilde{I}_x \to L_k} * EF * \left(1 - \frac{ER}{100} \right) \tag{15}$$

Siendo:

$E_{\tilde{I}_x \to L_k}$ Emisión total de CO_2 asignada a la carga L conectado en la barra "k" debido al consumo de potencia activa inyectada por el generado térmico conectado en la barra "x".

$PT_{\tilde{I}_x \to L_k}$ Participación total del generador conectado en la barra "x" en la potencia activa demandada por la carga L conectada en la barra "k"

EF Factor de emisión de CO_2 del tipo de combustible utilizado por el generador térmico conectado en la barra "x"

ER Porcentaje de reducción de CO_2, en el caso de utilizarse sistemas de reducción de CO_2 en el generador térmico conectado en la barra "*x*" (en nuestro caso, *ER*=0)

4 Caso de estudio

El método propuesto fue implementado en dos sistemas de prueba: un sistema de 5 barras y un sistema de 9 barras. En los dos sistemas de prueba, las potencias nominales de los generadores térmicos e hidroeléctrico han sido diseñados bajo las condiciones de máxima demanda.

Con la finalidad de analizar el impacto de la incorporación de una central fotovoltaica en las emisiones de CO_2 de un sistemas hidrotérmico se analizarón dos casos: caso 1, se utiliza el sistema hidrotérmico, caso 2, al sistema hidrotérmico utilizado en el caso 1, se incorpora una central fotovoltaica (SF) de potencia pico 100MW.

4.1 Sistema 5 barras

El sistema de prueba de 5 barras utilizado en este artículo se muestra en la figura 1. Este sistema está formado por una central térmica a base de gas natural (T_G) conectada en la barra 1, una central térmica a base de petróleo (T_P) conectados en la barra 4, una central hidroeléctrica (*CH*), conectado en la barra 3, dos cargas, una conectado en la barra 2 (L_2) y otra conectada en la barra 5 (L_5) y 6 líneas de transmisión.

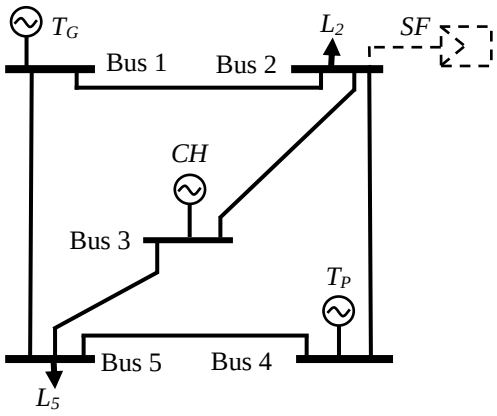


Figura 1. Sistema de prueba de 5 barras

En la tabla 1, se muestra el recurso y el factor de emisión de CO_2 según el tipo de central de generación eléctrica disponible en el sistema. En la tabla 2, se muestran los datos técnicos de las líneas de transmisión del sistema de prueba de 5 barras.

Con la finalidad de analizar el impacto que tiene la incorporación de una central fotovoltaica en las emisiones de CO_2 del sistema hidrotérmico de 5 barras. Al sistema

mostrado en la figura 1, se incorpora una central fotovoltaica (SF) de potencia pico 100MW en la barra 2.

Generadores			
Bus	Tipo	Recurso	Factor de emisión (g/kWh)
1	T_G	Gas natural	782
2	SF	Sol	0
3	CH	Agua	0
4	T_P	Gasóleo	1048

Tabla 1: Información básica de los generadores [1].

De bus	Para bus	r (pu)	x (pu)	b^{sh} (pu)
1	2	0.042	0.168	0.030
1	5	0.031	0.126	0.010
2	3	0.031	0.126	0.020
2	4	0.084	0.336	0.012
3	5	0.053	0.021	0.015
4	5	0.063	0.252	0.011

Tabla 2: Datos técnicos de las líneas de transmisión

En la figura 2, se muestran los consumos de energía eléctrica durante el día para las cargas L_2 y L_5. En la figura se observa que la carga L_5, tiene dos momentos de máxima demanda, el primero a las 11 horas, con una demanda máxima de 133.5MW y la segunda a las 20 horas, con una demanda máxima de 136.8MW. La energía consumida por la carga L_2, se incrementa desde las 6 hasta las 9 horas, posteriormente permanece casi constante hasta las 18 horas, a partir de la cual se incrementa hasta alcanzar su máxima demanda (93.3MW) a las 20 horas. La figura 3, muestra el perfil de generación de la central fotovoltaica (SF) durante el mismo día de análisis. En la figura se puede observar que la máxima potencia entregada por la central fotovoltaica (SF) es de 94.3MW a las 12 horas.

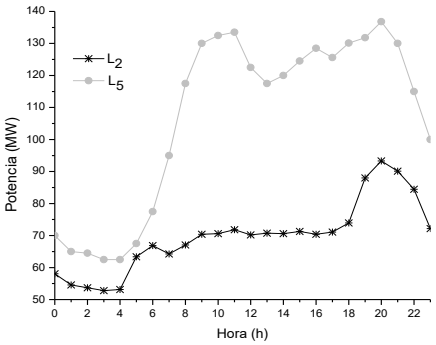


Figura 2: Perfil de demanda de las cargas conectadas en las barras 2 (L_2) y barra 5 (L_5)

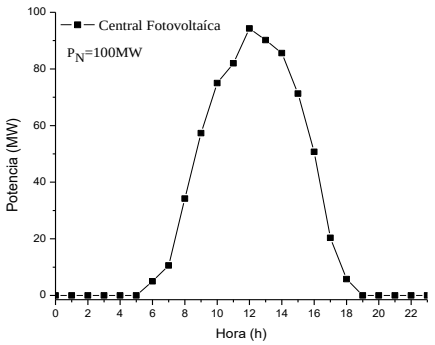


Figura 3: Perfil de potencia entregada por la central fotovoltaica conectada (SF) en la barra 2.

Para calcular la responsabilidad de las cargas en las emisiones de CO_2 debido al uso de energía producida por las centrales térmicas disponibles en el sistema, en primer lugar, para una carga en particular, se debe calcular cuanta energía consumida por esta, es suministrada por cada generador disponible al momento del análisis. Esto se consigue utilizando la ecuación (14). Los valores obtenidos mediante la ecuación (14), son

reemplazados en la ecuación (15), obteniéndose la participación de la carga, en las emisiones de CO_2 por cada generador térmico, durante la hora de análisis.

En la figura 4, se muestra la participación de los generadores en la potencia activa consumida por la carga L_2 para el caso 1. En la figura se puede observar que la potencia inyectada por la central hidroeléctrica (CH) y la central térmica a base de petróleo (T_P), permanecen casi constante, mientras que la central térmica a gas, tiene el mismo comportamiento que la carga, con una inyección máxima de energía de 52.75MW a las 20 horas. En la figura 5, se muestra la participación de los generadores en la potencia activa consumida por la carga L_2 para el caso 2. En la figura se observa que, desde las 0 horas hasta las 6 horas, el comportamiento se mantiene exactamente igual al caso anterior. A partir de las 6 hasta las 10 horas, la potencia inyectada por la central fotovoltaica se incrementa, disminuyendo la participación de las centrales térmicas e hidroeléctrica. Desde las 10 hasta las 15, la potencia entregada por la central fotovoltaica es mayor a la energía consumida por la carga L_2, por lo que toda la energía eléctrica consumida por la carga L_2 es suministrada directamente por la central fotovoltaica y el exceso de energía (región sombreada) es consumida por la carga L_5. Desde las 15 hasta 18 horas, se observa que: a medida que la energía inyectada por la central fotovoltaica disminuye, aumenta la participación de las centrales térmicas e hidroeléctrica. A partir de las 18 horas, el comportamiento es idéntico al caso 1.

En las figuras 6 y 7, muestran las emisiones de CO_2 de las centrales térmicas a gas (T_G) y a petróleo (T_P) asignadas a la carga L_2. Al comparar las dos figuras se puede observar claramente que a medida que se incrementa la potencia inyectada al sistema por la central fotovoltaica, la responsabilidad de la carga L_2 en las emisiones de CO_2 disminuye, hasta hacerse cero desde las 10 hasta las 15 horas, esto se debe que a en este intervalo de tiempo toda la potencia consumida por la carga L_2 es suministrada directamente por la central fotovoltaica. De esta manera se muestra los beneficios medioambientales de incorporar centrales de generación renovable en sistemas hidrotérmicos.

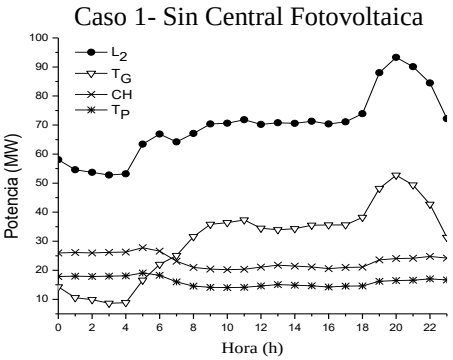


Figura 4. Participación de los generadores en la potencia activa consumida por la carga L_2

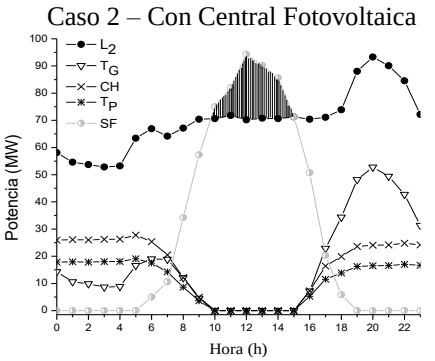


Figura 5. Participación de los generadores en la potencia activa consumida por la carga L_2

Caso 1- Sin Central Fotovoltaica

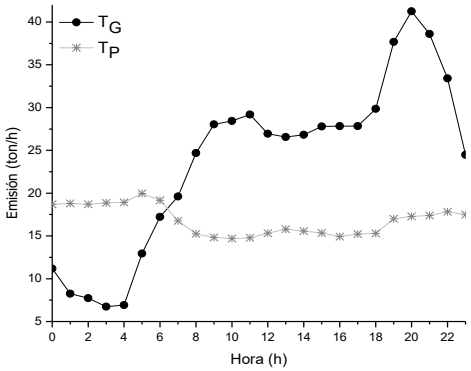


Figura 6. Emisiones de CO_2 por hora para los generadores T_G y T_P asignado a la carga L_2

Caso 2 – Con Central Fotovoltaica

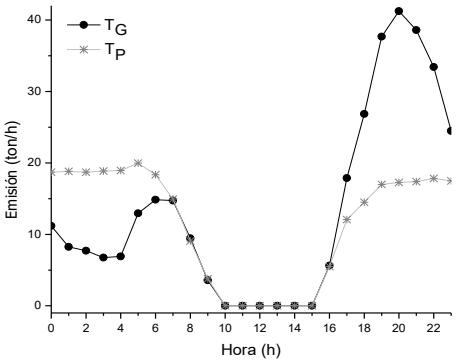


Figura 7. Emisiones de CO_2 por hora para los generadores T_G y T_P asignado a la carga L_2

En las figuras 8 y 9 se muestran las emisiones totales de CO_2 asignado a las cargas L_2 y L_5 para los casos 1 y 2, respectivamente. En las figuras, las regiones sombreadas representan el CO_2 que se deja de emitir debido a la incorporación de una central fotovoltaica al sistema hidrotérmico. También se puede observar que, a pesar que la central fotovoltaica fue conectada en la carga L_2 tiene efectos medioambientales positivos en la carga L_5.

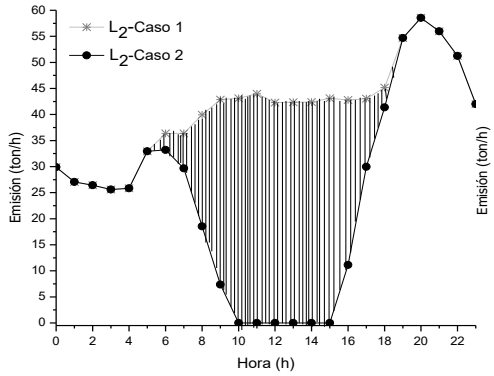


Figura 8. Emisión total de CO_2 por hora asignado a la carga L_2, en los casos 1 y 2.

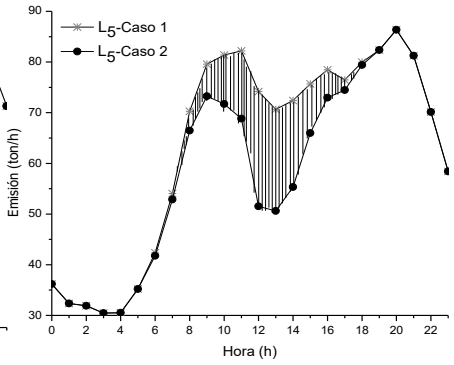


Figura 9. Emisión total de CO_2 por hora asignado a la carga L_5, en los casos 1 y 2.

	Emisiones (ton)		
Carga	Caso 1	Caso 2	ΔE
L_2	974	601.4	372.6
L_5	1512.9	1400.4	112.5
Total	**2486.9**	**2001.8**	**485.1**

Tabla 3. Emisión total de CO_2 durante el día para las cargas L_2 y L_5 en los casos 1 y 2

En la tabla 3, se resume los impactos ambientales de la incorporación de la central fotovoltaica en las emisiones de CO_2 asignado a las cargas L_2 y L_5. En términos generales se puede observar que, la carga L_2 deja de emitir 372.6 toneladas de CO_2, mientras que la carga L_5 deja de emitir 112.5 toneladas de CO_2, haciendo un total de 485.1 toneladas de CO_2 que se dejan de emitir en un día, si al sistema hidrotérmicas, se incorpora una central fotovoltaica de potencia nominal 100MW.

4.2 Sistema 9 barras

El sistema de 9 barras utilizado para probar el modelo propuesto se muestra en la figura 10. El sistema está formado por 2 generadores térmicos, 1 generador hidráulico, 5 cargas y 1 generador fotovoltaico. El estudio del impacto ambiental debido a la incorporación de la central fotovoltaica en la barra 8, será idéntico al desarrollado para el sistema de 5 barras.

En la figura 10 se muestran las potencias nominales de las diferentes centrales de generación eléctrica, así como también las demandas máximas de las diferentes cargas conectadas al sistema. El patrón de generación de la central fotovoltaica incorporada en la barra 8, es idéntico al utilizado en el sistema de 5 barras, mientras que el perfil de la demanda de las cargas L_4, L_5, L_6, L_7 y L_8 tiene el mismo comportamiento que el perfil de la carga L_5, utilizado en el sistema de 5 barras.

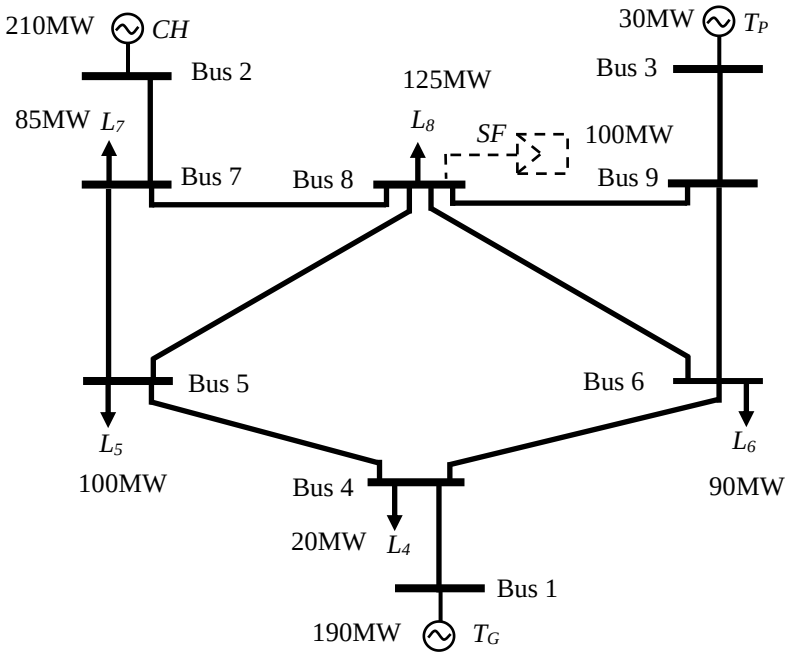


Figura 10: Sistema de prueba de 9 barras

En la figura 12, se muestra la participación del mix de generadores en la potencia activa consumida por la carga L_8. En la figura se observa que, conforme se incrementa la participación de la central fotovoltaica disminuye la participación de las centrales térmicas, en especial la central térmica a gas. Este comportamiento es menos pronunciado en la central térmica a base de petróleo, debido a que tiene menor potencia firme. La central hidroeléctrica tiene el mismo comportamiento. Entre las 6 y 18 horas, la potencia consumida por la carga L_8, es predominantemente renovable (hidroeléctrica y fotovoltaica), disminuyendo considerablemente sus emisiones de CO_2, como se muestra en la figura 12.

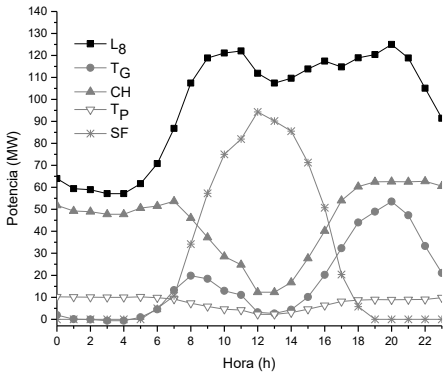


Figura 11. Participación de los generadores en la potencia activa consumida por la carga L_8

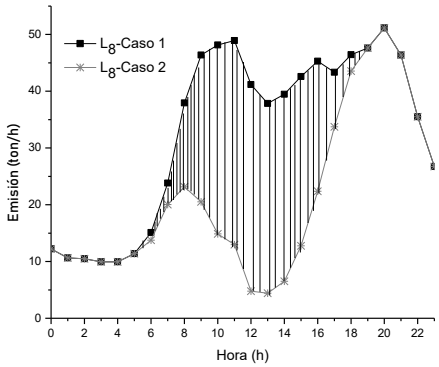


Figura 12. Emisiones de CO_2 por hora para los generadores T_G y T_P asignado a la carga L_8

En la tabla 4, se resume las emisiones totales asignadas a las cargas L_4, L_5, L_6, L_7 y L_8, mediante el método propuesto. En la tabla se observa que, la incorporación de una central fotovoltaica de potencia pico 100MW en la barra 8, reduce las emisiones de CO_2 de la carga L_8, en un 35.9%, y un 17.7% de las emisiones globales del sistema

	Emisiones (ton)		
Carga	Caso 1	Caso 2	ΔE
L_4	125.3	111.7	13.6
L_5	631.7	568.1	63.6
L_6	563.8	503.7	60.1
L_7	540.8	492.8	48
L_8	788.5	505.5	283
Total	**2650.1**	**2181.8**	**468.3**

Tabla 4. Emisión total de CO_2 durante el día para las cargas L_4, L_5, L_6, L_7 y L_8, en los casos 1 y 2

Como se ha mencionado anteriormente el incremento en las concentraciones de gases de efecto invernadero (CO_2, CO, CH_4, etc.), alterando el balance de energía en la

atmósfera, aumentando la temperatura promedio del planeta, esto genera modificaciones en los diferentes ecosistemas existen y con ello afecta el desarrollo sostenible del hombre. Esta preocupación ha llevado a muchos países alrededor del mundo a firmar compromisos internacionales como es el caso de la Conferencia de las Partes, COP, por sus siglas en ingles de "*Conference of the Parties*", de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático, en la que se comprometen a reducir sus emisiones de CO_2 con respecto a un escenario base en un tiempo determinado. Las reducciones de emisiones de CO_2 engloban las diferentes activadas económicas desarrollada en cada país. Con respecto al sector eléctrico, en este artículo se propone una metodología que permite calcular la responsabilidad de los consumidores de energía eléctrica en las emisiones de CO_2 de los generadores térmicos que participan en el despacho de carga y a la vez permite calcular las reducciones en las emisiones de CO_2 debido a la incorporación de fuentes de energía renovable al sistema eléctrico.

5 Conclusiones

En este artículo se desarrolló una metodología basada en la teoría de circuitos en combinación con el método Aumann- Shapley para calcular en forma justa y transparente la responsabilidad que tiene cada consumidor de energía eléctrica en las emisiones de CO_2 de un sistema hidrotérmico.

Se demostró analíticamente que la incorporación de una central fotovoltaica disminuye considerablemente las emisiones de CO_2 producidos en un sistema hidrotérmico.

La simplicidad matemática y el bajo consumo de recursos computacionales, convierten al método propuesto, en un excelente candidato para ser aplicado en sistemas que requieren la asignación de emisiones de CO_2 en tiempo real.

6 Agradecimientos

Los autores dan las gracias a la Red Temática de la CYTED "CIUDADES INTELIGENTES TOTALMENTE INTEGRALES, EFICIENTES Y SOSTENIBLES (CITIES)" nº 518RT0558 y al Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica (CONCYTEC), por financiar este trabajo de investigación.

7 Bibliografía

[1] S. Nazari, O. Shahhoseini, A. Sohrabi-Kashani, S. Davari, R. Paydar, and Z. Delavar-Moghadam, 'Experimental determination and analysis of CO2, SO2 and NOx emission factors in Iran's thermal power plants', Energy, vol. 35, no. 7, pp. 2992–2998, Jul. 2010

[2] P. Zhou , M.Wang, 'Carbon dioxide emissions allocation: A review - ScienceDirect', Ecological Economics, Mar. 2016

[3] G.-R. Walther et al., 'Ecological responses to recent climate change', Nature, vol. 416, no. 6879, pp. 389–395, Mar. 2002

[4] N. L. Panwar, S. C. Kaushik, and S. Kothari, 'Role of renewable energy sources in environmental protection: A review', Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 15, no. 3, pp. 1513–1524, Apr. 2011
[5] U.S. Energy Information Administration (EIA), 'Annual Energy Outlook 2018 with projections to 2050'. Feb-2018
[6] B. P. J. Leenders, J. C. Velázquez-Martínez, and J. C. Fransoo, 'Emissions allocation in transportation routes', Transp. Res. Part Transp. Environ., vol. 57, pp. 39–51, Dec. 2017
[7] D. Babusiaux and A. Pierru, 'Modelling and allocation of CO2 emissions in a multiproduct industry: The case of oil refining', Appl. Energy, vol. 84, no. 7, pp. 828–841, Jul. 2007
[8] M. I. Alomoush and Z. B. Oweis, 'Environmental-economic dispatch using stochastic fractal search algorithm', Int. Trans. Electr. Energy Syst., vol. 28, no. 5, p. 2530
[9] Molina, Yuri P., Ricardo B. Prada, and Osvaldo R. Saavedra., 'Complex Losses Allocation to Generators and Loads Based on Circuit Theory and Aumann-Shapley Method', IEEE Journals & Magazine, vol. 25, no. 4, pp. 1928–1936, 2010
[10] Yuri Percy Molina Rodriguez, *Alocação das Cargas e das Perdas Complexas via Teoria dos Jogos*. Novas Edições Acadêmicas, 2018

Data Acquisition for User Identification on Smart Buildings throughout the Act of Opening a Door

Jesús Vegas[1], César Llamas[1], Manuel A. González[2] and Carmen Hernández[1]

[1] Departamento de Informática, Universidad de Valladolid, Spain,
jvegas@infor.uva.es, cllamas@infor.uva.es, chernan@infor.uva.es
[2] Departamento de Física Aplicada, Universidad de Valladolid, Spain,
manuelgd@termo.uva.es

Abstract. One of the main interests on the area of Asisted Ambient Living is how to embed the capability of identifying subjects in quotidian objects that surround us. This paper describes a small system that when attached to a usual door handle provides a vector consisting of accelerations and angular velocities that could be used to assist a system in charge of grant access to a door when a subjects interacts with the doorknob. The main hypothesis of the whole system is that each user has a unique way to interact with a door handle which could be used to identify him/her and use this information to perform, or not, the opening of the door. The experimental installation described here comprises several sensors which allows to register the linear accelerations and angular speed of the handle when is operated by an user to open a door. The main result of this work is a unobstrusive, open and affordable platorm that will be used to build a corpus of data comprising information of a group of users trying to open a door. This dataset will be used in an initial assesment of the feasibility of the task and the validity of the main hypothesis.

Keywords: ambient intelligence, human action recognition, implicit human computer interaction, open source hardware-software

1 Introduction and Objectives

In the research community of Internet of the Things (IoT) is its applications one of the hot spot areas is the so called Ambient Assisted Living (AAL). In other words, AAL deals with the exploitation of IoT advances in an immediate human context. In this kind of systems, the subject plays a main part in (i) applications where humans exerts some control on system, (ii) applications where the system monitors humans in order to take some appropriate action, and (iii) some combination of (i) and (ii) [12].

This paper describes the initial research stage in developing a system capable of qualifying the intention of a person when trying to open a door by the form in what she/he actuates on the doorknob. This *small* action could be a part of some other larger one involved in a chain of acts of a subject through out a building.

An actual hardware/software system has been built and is being actively used to acquire datasets suitable to be used in our research on Ambient Intelligence (AmI).

1.1 Background

Nowadays, AmI holds a principal part the research area on Information Technology. Here, the client subject of the system gets along with an environment where the natural interaction with everyday objects serves inputs into a computationally enhanced reactive ambient, be it restrictive or pleasurable. This environment could be used to enforce a security policy, provide some safety service such as monitoring an elder or an impaired person, and even provide some comodity. The main characteristics that marks a system as Ambient Intelligence enabler are:(a) context Awareness, (b) personalization, (c) anticipation, (d) adaptation, (e) ubiquity and (f) transparency [1].

With regards to AmI, where the context of the user is the key, the analysis and identification of the human activities is a main field of research. Depending on their complexity there are various types of human activities that can be categorized into four different classes: gestures, actions, interactions, and group activities [2]. The design of this kind of systems is not an easy task, and poses many challenges on how to achieve robustness, openess, security, optimal throughput and many other ones that are the subject of an active research community [15].

The gestures are the atomic components of the motion of a person, and a composition of them produces an action. The interactions are activities that involve objects with two or more people. The presence of conceptual groups composed of multiple persons and/or objects define a group activity. Nevertheless, other classifications of human activities are based on the duration of the action. For example, in [16] an action is a simple motion patter usually implicating a single person and lasting short durations of time, typically on the order of seconds, whereas an activity refers to a complex sequence of actions performed by several humans and characterized by much longer temporal intervals.

One use of the analysis of human activities is the identification of the person who is doing the action. This identification is the base for AmI applications where the answer of the system to an implicit input depends on the identity of the human who is making the action, as for example in a building access or room climate control.

In this paper, we describe the first stage pursued by our research group into a challenging task: how to identify a person automatically on the basis of her/his interaction with the handle of a door, when he/she is trying opening the door. This task must be obtained in a completely transparent manner.

Identify the user using a door handler is an ambitious application of *implicit human computer interaction* (iHCI) in the context of AmI. Regarding the classification of human activities referred above, this case must be considered as a *micro-action* if we consider it an atomic part of a more complex one that consists in "openning a door" so its temporary duration is only of a fraction of a second.

This kind of system meets many applications relevant to *security* and *assisted living*. In relation to the first one it could be used to instrument *access control* and *tracking and monitorization* mechanisms for individuals in a building for emergency and energetic efficiency issues as stated by Nguyen in [13]; while *assisted living* comprises some other objectives related to safety, health monitoring and helping.

Biometrics studies the automation of the identification of a person based on his or her physiological or behavioral characteristics [8]. According to this definition, the form in what a person interacts with a door handle can be considered inside the biometrics area. Among the sort of biometric technologies actually in use, the most popular are: face recognition, eye recognition, speech recognition and, of course, hand and finger recognition[8]. Although some of them could be suitable to be used in our task most of them requiere an specific gesture aimed to the recognition to allow the identification, p.e. waiting in front of a camera to be recognized or laying the finger on a fingerprint scanner.

However, some promising biometric characteristics that can be implemented in a transparent way are the vision enable camera-based and sensor-based identification. In the first case, a camera mounted in the door can obtain the image of the people close to the door and analyze it to determinate it's identity [9, 14]. The second technique is based in the acceleration data of the gait of the person, obtained by sensor attached to him/her, which can used to identify him/her while he/she is walking approaching to the door [10]. In this case the sensoring and communications facilities can be supplied by a smartphone carried by the subject [3]. In these two cases, the identification technique can be qualified as transparent and, therefore, suitable to be used in an iHCI opening door control access.

Our approach must try to identify a subject who is trying to enter in a room by the acceleration and angular speed produced in its interaction with the door handle just before to open the door. The main goal of our proposal is to devise an experimental hardware/software system suitable to fulfill the task of gathering data from a common doorknob so the information allow us to identify a subject. This way, the system could enforce an specific policy allowing her/him to open of the door, or not. The experimental installation comprise sensors attached to the door handle which allows to register the linear accelerations and angular speed of the handle when is operated by an user to open the door. There not seems to be many studies in this area; in a preliminary paper Fujinami *et al.* [4] combined accelerometers attached to the door and to the wrist of the user to identify the person opening the door, and later paper [5], Gjoreski *et al.* describe their experience in recognizing a person who enters using only the door acceleration, and obtains an accuracy of 90%, therefore confirming the feasibility of the task.

Although there are some works related to the identification of the person who is opening the door, to the best of our knowledge, our work is the first attempt to identify a person using the door handle biometric. The difference is crucial, because the works referred before will no be useful to be used as control access, because once the individual has to open the door to be identified. Our challenge

is to accomplish the identification at the same time the person is operating the handle to open the door

The next section of this paper describes the main requirements of the platform and the hardware and software model of the system in order to comply with the requirements previously stated. After that, the actual throughput of the system and the adequacy of the platform constructed is discused. Finally, some conclussions are presented.

2 Design

As previously stated, most AmI systems must fit some general properties, most of them related to the perception of the end user. Therefore, our platform must be:

1. **Unobstusive**: the device must not interfere with the usual way in what a person interacts with a door-knob while trying to open a door (action transparency).
2. **look and feel transparent**: it does not add any new element the could be perceived in comparison with a usual door.
3. **autonomous**: the system must accomplish the minimal function unthetered.

In addition to these we have imposed two major properties that

4. **low-cost**: the system must be affordable enough to be present in many doors.
5. **open-source**: the platform must be open in order to be extended and configurable, allowing the collaboration of the researchers. This ensures the reproductibility of the platform to permit the construction of new datasets and assert the validity of the conclusions [17].

Gjoreski *et al.* present results ranging from 85% of accuracy of subject recognition [5] using a system in what measures about the movement of the door are collected, and not only those of the doorknob. They fix accelerometers and gyroscopes to the door, and a quite good results are obtained with sampling frequencies below 100Hz. However, we focuse only in the handle that is subject to more faster actions and forceful accelerations so we decided to attain sampling frequencies of no less than 500 Hz.

Our teamwork has been developing recently some platforms of this kind with applications in two main areas wearable sensoring for human motion analysis, and sensoring for physics laboratory [10, 11]. On the first case, a special care was taken for comply all the five requierements, while on the second we were more concerned with open-source and affordability.

Figure 1 depicts a simple lever bar doorknob is sketched. The main component on the top is the main board, that is connected to a tiny sensor board attached to the end of the handle. That sensor must be able to collect acceleration and angular velocity in the two main coordinates of interest. Aligning properly a 6 DOF sensor according to the axes depicted in the figure, we can measure *X-axis* acceleration and *Z-axis* angular velocity. From the holonomic

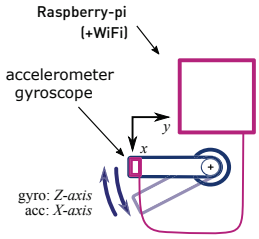


Fig. 1. Experimental setting for the sensoring platform with a simple lever bar doorknob.

restrictions for the system, even Z axis angular velocity could be inferred from X axis acceleration and contour restrictions given that the coordinate axis rotate rotate as the doorknob is being used.

For the hardware design, our experience drove our efforts to a Raspberry Pi/2 board that consists of a Broadcom BCM2837 ARM7 Quad Core Processor running at 900Mz, and 1 GB of RAM. This standard configuration is well known in the domain of open source hardware domain of research, and allows any designer to adhere to the open hardware and software community practice. This board offers also a standard 40 pin extended General Purpose IO (GPIO) where to connect some sensors and actuators throughout digital interfaces. The connectivity of the system is ensured by an USB WiFi interface. A 2000 mAh battery could power up the system for enought time to carry on all the data collection operation. This way, the whole system could be attached to the dood in an unobstrusive way.

2.1 Sensoring

The key sensoring element of our platform is the accelerometer and gyroscope sensing unit. We decided to use a well known part as the MPU 6050. This chip can be found embedded in more complex chips like the MPU 9250 that includes, in addition, a three axis magnetometer, so this configuration provides a full 9 DOF solution with two possible interfaces, I2C and SPI, a wide range of sampling rates with a superb bit resolution [7].

Given that the main purpose of our sensoring platform is to gather all information related to the experiment we decided to include two other sensors in order to be able to detect the instant in what the subject initiates or finishes the action on the doorknob. One possibility is to include an infrarred unit and other one is to include a capacitive sensor that reacts to the proximity of a hand.

For the first one, a simple linefollower line tracker was considered. This kind of elements are very popular in the industry to give acurate thresholds on the change of reflectivity in the proxymity up to 1 and 2 cm. This tiny unit could be placed very near a place where the user is supposed to hand the knob. The other element is a capacitive touch sensor like the pupular MPR121 that takes the form

of a little board that interacts through an I2C interface, and its characteristics have made it very popular in robotics and DIY community [6]. The sensing part of the MPR121 consists of 12 electrodes that permit different calibration thresholds from 10pF to over 2000pF and is capable to detect actions without even direct contact with the subject.

2.2 Configuration and deployment

The hardware design of the platform is detailed in the Figure 2. A red LED was included for inspecting purposes and is controlled by the software in charge of the main acquisition loop. In the actual system a power source must be included and a little bit of hobbyst work gather all the items at place.

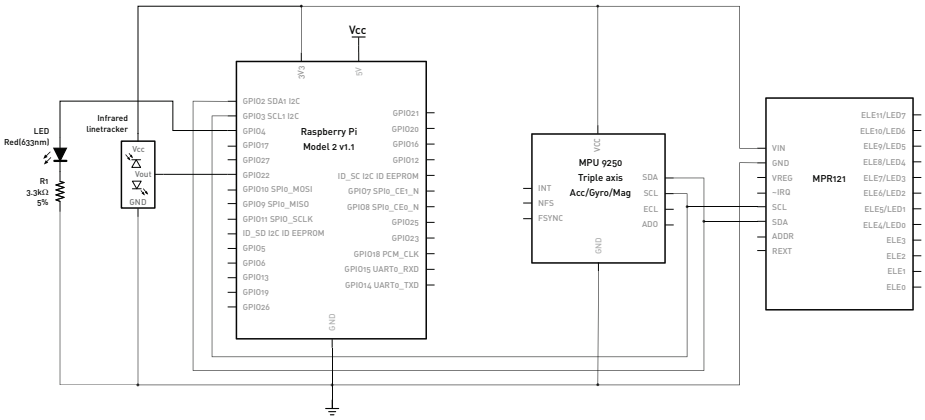


Fig. 2. Detailed circuit sketch including Raspberry Pi and sensors

The system is intended to be sticked to a knobdoor where the setting is ready to commence the probes and the acquisition of actual samples from subjects. The hardware will be commanded throught a remote wireless console provided by an ad-hoc connection supported by the Raspberry-pi acting as an access point.

2.3 Software design and application

The Raspberry pi board of the platform is currently supported by Raspbian Jessie, a Linux alike distribution for the ARM architecture of RPi, provided that our solution does not needs a strong real time and high performance capabilities. Then the lack of real time support and the preemptive behaviour of this distribution is more than enough for our purposes [10]. There is a much discussion, however, about what could be the best language support for coding this kind of systems. The factors that must be considered are expressiveness and maintainability, accessibility to hardware devices and throughput. Our preferred

choice of language for this case is Go Language in spite that previous projects were successfully developed in C Language.

Go is an open programming language that keeps a good balance between speed, expresiveness and access to low level device drivers. Several early designs were capable to get sampling rates over 600 Hz, that is more than enough for our requirements. This way, a more low level aproximation was unnecessary and therefore the concurrency and buffering Go packages were very handy for us.

The logic design of the application operates throughout all the acquisition session in a well established loop strategy that comprises a *Setup* section for each acquisition, an *Acquisition loop* to gather sample data and a *Commit* section to store persistently the data.

- *Main loop* for each data series:
  1. *Setup*: Reset registers, create circular buffer for continuous acquisition and persistent final buffer for consolidated data.
  2. *Acquisition loop*:
     (a) Acquire data from sensors into the circular buffer.
     (b) If the check for 'subject using the doorknob' is negative then resume the *Acquisition loop*.
     (c) Copy previous data from the circular buffer into the final buffer.
     (d) Continuous acquisition loop:
     - Gather data and copy to the final buffer.
     - If the check for 'subject using doorknob' is negative then resume the *Main loop*.
  3. *Commit*: Write data from the final buffer to an achive, and proceed to the *Setup* stage at the begining of the *Main loop*.

This design ensures, given that the subject is well behaved, there is no loose of samples due to an imprecise detection window because the circular buffer stores data with an anticipation enough until a clear onset of 'acquiring' is well established. Nevertheless, the soundness of the algorithm relies on the accuracy of the 'subject using the doorknob' function. In fact, in our case this function is implemented throughout an straightforward algorithm where a short moving average filter output is compared with a single threshold. We consider that the whole *Main loop* performance must not be compromised by a too much refined algorithm.

3 Discussion

The picture in the Figure 3 shows the actual device mounted on a doorknob. On top of the central unit, a power supply provides autonomy to the system. A minimum interference with the subject must be our goal in this stage, and the cable connecting the accelerometer to the central unit is a light enough to not disturb mechanically the lock.

To be able to put the finishing touches in our experimental system, a set of acquisitions were made with an assorted set of subject with differen physical

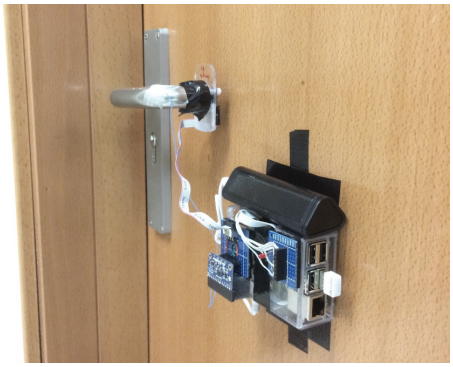


Fig. 3. Snapshot showing the acquisitiion platform affixed to a door and to the lever doorknob

constitutions and ages. From this experience, some valuable conclussions were obtained and the most remarkable of there were that neither the IR sensor nor the capacitive MPR121 sensor were usable in practice, because the accuracy of their observations were far from be exact.

In relation with the IR sensor, we could verify that its very difficult to establish a correct place for it because the variability in the sizes of the hand and, the most important, the many different ways to grab the lever makes this method of detection very unprecise. This sensor was discarded in the early stages of experimentation and it is not even present in the Figure 3.

A more detailed discussion could be made on the capacitive sensor usability that could be summarized in that the static charge of every different user, and the imposibility of electrically isolating a real doorknob made almost impossible to devise proper set of threholds for our device. If we intend to include this experimental setting in several real systems, it is not admisible to have to perform any change in an actual door. Sure could be possible to mechanize the lever and the door from the picture, but this is clearly far from our experimental setting.

To solve the problem of stating the start of the real action of the user on the door, a threshold detection algorithm considering the real measured values of the acceleration and angular velocity were considered. In the Figure 4, a real sampling data series is plotted using the measures obtained for the X-axis accelerometer and the Z-axis gyroscope. The sampling rate obtained was well over 600 Hz and this imposes an estimated lenght for the circular buffer of near 250 samples. The check algoritm was tuned for a set of 5 subjects and shows to have a good and stable behaviour.

4 Conclusions

A real system has been built for a doorknob data acquisition in order to construct a dataset usable for identifying subjects in a context of Ambient Intelligence. We

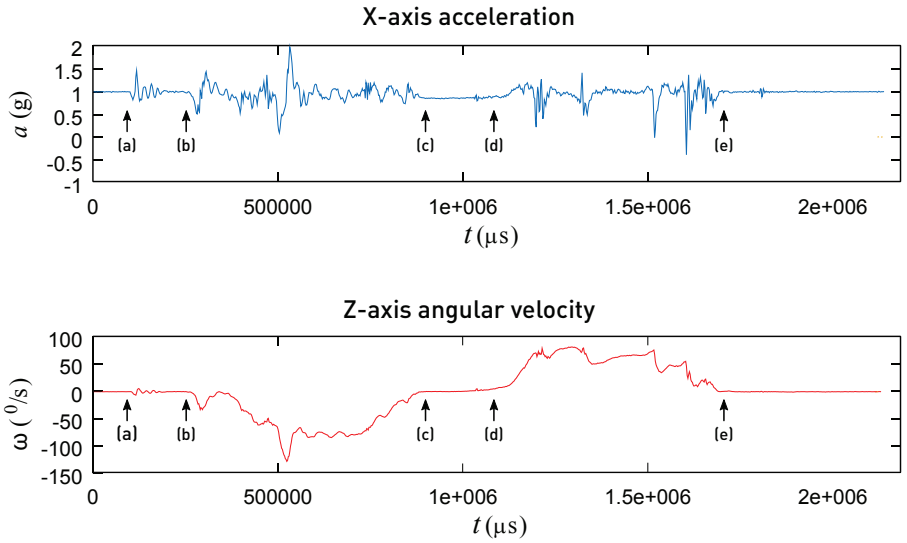


Fig. 4. Plot of an actual acquired data series for the X-axis accelerometer and the Z-axis gyroscope. A rough inspection of both curves allows us to match approximately each piece of them with a different stage of the user action: (a) the hand of the subject gets in contact with the lever, (b) the subject starts to push down the lever, (c) the lock mechanism meets the stop end, (d) the subject starts to release the pressure on the lever and (e) the lever gets its initial rest state.

consider that this kind of effort well suited to the final goal of design and build an Smart Building. Therefore we have made an effort to design an unobstrusive, extensible and affordable platform that could serve as a prototype for a larger scale of fabrication device in what this device could be embedded in an actual system. The device is also autonomous and serves well in a WiFi connected environment.

Further from the discussion of this work, it can be said that this platform has made possible the creation of a dataset suitable for the task of user identification with more than 40 subjects, and some preliminary results show promising recognition rates using neural networks and SVM classifiers.

Our proposal is very affordable in hardware terms given that the cost is no more than €150, and the components are open-source hardware. In our opinion, this system is a good candidate to be acquired in the case that a research workgroup is interested in the creation of a data set for an experimental use related to small quotidian objects as a doorknob and any other small mechanical device like this.

Acknowlegments. The authors would like to thank the CYTED thematic network "CIUDADES INTELIGENTES TOTALMENTE INTEGRALES, EFI-

CIENTES Y SOSTENIBLES (CITIES)" # 518RT0558 for the support offered in the development of this work.

References

1. Acampora, G., Cook, D.J., Rashidi, P., Vasilakos, A.V.: A survey on ambient intelligence in healthcare. Proceedings of the IEEE **101**(12), 2470–2494 (2013)
2. Aggarwal, J.K., Ryoo, M.S.: Human activity analysis. ACM Comput. Surv. **43**(3), 1–43 (2011). DOI 10.1145/1922649.1922653
3. Fenske, J.: Biometrics in new era of mobile access control. Biometric Technology Today **2012**(9), 9–11 (2012). DOI 10.1016/S0969-4765(12)70185-6
4. Fujinami, K., Pirttikangas, S., Nakajima, T.: Who opened the door?: Towards the implicit user identification for sentient artefacts. In: International Conference on Pervasive Computing, vol. 207, pp. 107–111 (2006)
5. Gjoreski, H., Piltaver, R., Gams, M.: Person Identification by Analyzing Door Accelerations in Time and Frequency Domain. In: European Conference on Ambient Intelligence, pp. 60–76 (2015). DOI 10.1007/b102265
6. Hamidi, F., Baljko, M., Kunic, T., Feraday, R.: Do-it-yourself (diy) assistive technology: a communication board case study. In: Computers Helping People with Special Needs, pp. 287–294. Springer (2014)
7. Inc., I.: Mpu-9250 product specification revision 1.1. Tech. rep. (2016). URL http:\\www.invensense.com
8. Jain, A., Hong, L., Pankanti, S.: Biometric identification. Communications of the ACM **43**(2), 90–98 (2000). DOI 10.1145/328236.328110
9. Jalal, A., Kim, Y.H., Kim, Y.J., Kamal, S., Kim, D.: Robust human activity recognition from depth video using spatiotemporal multi-fused features. Pattern Recognition **61**, 295–308 (2017). DOI 10.1016/j.patcog.2016.08.003
10. Llamas, C., González, M.A., Hernández, C., Vegas, J.: Open source platform for collaborative construction of wearable sensor datasets for human motion analysis and an application for gait analysis. Journal of Biomedical Informatics **63**, 249–258 (2016). DOI 10.1016/j.jbi.2016.08.025
11. Llamas, C., Vegas, J., González, M.Á., González, M.Á.: Open-source sensors system for doing simple physics experiments **10**, 100,004–1–100,004–4 (2018). DOI 10.4279/PIP.100004
12. Munir, S., Stankovic, J.A., Liang, C.J.M., Lin, S.: Cyber physical system challenges for human-in-the-loop control. In: Feedback Computing (2013)
13. Nguyen, T.A., Aiello, M.: Energy intelligent buildings based on user activity: A survey. Energy and buildings **56**, 244–257 (2013)
14. Sivarathinabala, M., Abirami, S., Baskaran, R.: A Study on Security and Surveillance System Using Gait Recognition, pp. 227–252. Springer International Publishing, Cham (2017). DOI 10.1007/978-3-319-44790-2_11
15. Stankovic, J.A.: Research directions for the internet of things. IEEE Internet of Things Journal **1**(1), 3–9 (2014)
16. Turaga, P., Chellappa, R., Subrahmanian, V.S., Udrea, O.: Machine recognition of human activities: A survey, Circuits and Systems for Video Technology. IEEE Transactions **18**(11), 1473–1488 (2008)
17. Vegas, J., Llamas, C., Hernández, C., González, M.A.: Is Open Science the Same as Open Source Science? Biostat Biometrics Open Acc J. **1**(4) (2017). DOI 10.19080/BBOAJ.2017.01.555569

Intelligent Flexibility Management for Prosumers: Development of Algorithms for the Energy Management of Electric Vehicles, Loads, Generators and Batteries

Sara Barja-Martínez[1], Pol Olivella-Rosell[1], Pau Lloret-Gallego[1], and Roberto Villafáfila-Robles[1]

Centre d'Innovació Tecnològica en Convertidors Estàtics i Accionaments (CITCEA-UPC), Departament d'Enginyeria Elèctrica, ETS d'Enginyeria Industrial de Barcelona, Universitat Politècnica de Catalunya, Avinguda Diagonal, 647, Pl. 2, 08028 Barcelona, Spain,
sbarjamartinez@gmail.com,

Abstract. Cities nowadays face multiple challenges, among which energy efficiency of homes, how to cope with the increasing presence of the vehicle and small-scale renewable energies penetration in the grid are a the most outstanding. A new way to manage and generate electricity is needed, and this will be possible by transforming current cities into smart ones. This study focuses on intelligent households that are managed by the Home Energy Management System. This software plays a critical role in giving a flexibility service to the electric system, since it allows an automatic control of the small renewable generators and the controllable devices that use energy in the home, with the objective of minimizing the prosumer electricity bill. Two scenarios are considered; the first one aims to explain the Home Energy Management System behaviour optimizing the electricity bill of one prosumer. The second one analyzes the behavior of a group of prosumers that optimize their energy bill individually, and how this affects the electricity distribution system.

Keywords: Prosumer, Flexibility, Energy Management System, Smart Cities

1 Introduction

Emission of greenhouse gases and their effects on climate change have become a matter of serious concern all over the world, and cities will play an important role in this issue: due to the high population density, they are intensive centers of electricity consumption. Also, the increase of small-scale renewable energies and the drawback of their variability and volatility along with the electric vehicles (EV) will also condition the energy future. That is why an energy transition is necessary, and maximizing the energy efficiency of homes and residential dwellings and transform them into smart ones are a major priority.

Recent researches have provided the tools for modernizing the traditional grid into a smart one, which objective among others is to coordinate an ever-growing number of intelligent devices, electric vehicles and renewable sources, each with their own objectives and value perspectives, into a resilient, secure, and efficient system.

Here is were the flexibility concept plays an important role in the upcoming energy transition, understanding flexibility as the ability to change certain previously defined parameters in order to fit new requirements.

1.1 Home Energy Management System state-of-art

A Home Energy Management System (HEMS) research has been made to know the state-of-art of this technology. Also, different ways of approaching the HEMS objective function are exposed.

In the foreseeable future, the smart grid challenge is to figure out how to coordinate an increasingly number of intelligent homes, each one of them with their respective smart devices and own objective and comfort levels, into a resilient, secure and efficient energy system [12]. Hereunder, a research has been made to get to know the state-of-art of HEMS technology in smart households nowadays.

The vast majority of literature presents the HEMS algorithm as an automated decision-maker technology. According to Beaudin and Zareipour [2], a HEMS is a demand response tool that shifts and curtails demand to improve the energy consumption and production profile of a house according to electricity price and consumer comfort.

An intelligent HEMS includes a controller, an in-home display and a set of smart appliances and smart meters [10]. These last ones are connected (wired or wireless) to the HEM controller. An analysis of functionality, quality and behavior of 308 HEMS smart appliances is outlined in [7]. In addition, a security analysis of an advanced metering infrastructure has been evaluated by Hansen, Staggs, and Shenoi [9], where possible targets and attacks to these appliances and their consequences are described. Zafar et al. [25] reviews the HEMS communications technologies as well as the most relevant optimization techniques, along with future associated challenges.

The objective function of a HEMS model can be focused on different aspects under different perspectives. For instance, it depends on what flexibility services are demanded. Olivella-Rosell et al. [14] explains in detail the different flexibility customers and what kind of flexibility services they demand. Flexibility customers are mainly the Distribution System Operator (DSO), the Balance Responsible Party (BRP) and prosumers. Prosumer means a customer who consumes, stores or sells electricity generated on their premises, including through aggregators, or participate in demand response or energy efficiency schemes provided that these activities do not constitute their primary commercial or professional activity ([6])

The DSO flexibility services are focused on preventing grid overloads, BRP aims to compensate energy deviations and prosumers seek to reduce electricity

bill individually with the minimum sacrifice in the dwelling comfort. Olivella-Rosell et al. [15] objective function minimizes the operation cost for the aggregator in order to meet the DSO request of flexibility. Sattarpour, Nazarpour, and Golshannavaz [21] proposes a multi-objective function that pursuits two objectives: a minimum energy payment cost of home appliances and an attempt to flatten the load profile, so home owners could effectively assists the DSO. Even though this last objective function does not directly benefit the end-user, the DSO could handle the upstream network operation and end up in higher economic savings, which are fairly divided between the DSO and the end-users through a signed contract. Elma and Selamogullari [5] suggests to reduce peak demand thanks to voltage control, which allows to reduce the power consumption of residential controllable appliances. [10] aims to minimize electricity cost and Peak-to-Average Ratio by optimal usage of power from grid. Grid capacity (kW) should not be exceeded. Total energy cost is reduced by shifting load from on-peak hours to off-peak hours. Algorithm proposed by Pipattanasomporn, Kuzlu, and Rahman [17] focuses on managing household power intensive appliances in order to keep the household power consumption below a specified demand limit level (kW): The HEMS receives a external signal by the DSO/BRP, which includes demand curtailment request and duration. These intensive appliances are: space cooling unit, electrical water heater (EWH), clothes dryer and EV; moreover home-owners can set their load priority and comfort preference.

Shakeri et al. [22] proposes a cost function where grid power is reduced as minimum as possible, prioritizing self photo-voltaic (PV) production, in order to optimize the electricity consumption cost. Hence, the proposed algorithm limits the maximum power we can drain from the grid. A thermal model of the building is defined in [8]: customer's preferences are a priority for the HEMS along with minimizing the daily cost of energy. Two cost functions are formulated: one as a Price-Based program (PBP) and the other as an Incentive-Base Program (IBP). In a IBP, a financial incentive is given for each kWh of consuming below the baseline load. On the other hand, the customer is charged for each kW of the daily peak demand. Selling electricity to the grid at variable prices is also considered in the final cost function. This optimization problem requires technical data of EWH and EVs, outdoor temperature, and consumers hot water demand as inputs. A multi-objective model predictive control is explained by Jin et al. [11], wherein the objectives consist in minimize energy cost, keep thermal comfort within agreed values, maximize the user convenience by not delaying too much cycles of scheduled appliances, and reduce carbon emission, penalizing the loss of CO_2 reduction by curtailing the on-site PV generation and back-feeding the PV power to the grid. User ranks the electrical appliances services to indicate relative preferences. Nguyen, Nguyen, and Le [13] considers the Real Time Pricing (RTP) scheme and solar radiance with uncertainty, consequently a rolling optimization is propose to solve the objective function. Moreover, a solar collector is taken into account in order to transform solar energy into thermal energy for the water heater. In addition, heating ventilation and air conditioning (HVAC) transfers heat into the water tank by circulating a refrigerant through

a cycle of evaporation and condensation. The objective is to focus on the control of the solar assisted HVAC and water heating system. R. Jovanovic [19] takes the preferences of participating households into account and aims to minimize the overall production cost and, in parallel, to lower the individual electricity bills. Pombo, Murta-Pina, and Pires [18] develops a multi-objective formulation that aims to find the optimal number and location of switches and the optimal location, number and size of the battery banks. Silva and Hendrick [23] centers his work in optimizing PV and lithium-ion storage installations, through real households data. An economic analysis of the energy system, named Levelised Cost of Energy (LCOE), is formulated and used.

1.2 Outline of the paper

This work is organized as follows: Section 2 outlines the mathematical problem formulation. The case studies definition are defined in Section 3, while Section 4 shows the results of the case study. Ultimately, conclusions are presented in Section 5.

2 Mathematical problem formulation

This section formulates and explains the mathematical problem of the different available flexibility sources in the households. These models are based on the INVADE project [1]. Once the flexible models have been described, it is proceed to formulate the entire HEMS model, which will cover all the flexibility sources models along with the prosumer flexibility service constraints, which include the market tariff restrictions.

2.1 Electric vehicles constraints

The EV flexible model applied in this study allows to control and interrupt the charging session, that is to say, we are able to delay and control the charging process by reducing power levels or interrupting the charging session. The final charging profile $\phi_{t,v}^{ch}$ can be shaped in a different way than baseline in order to give a flexibility service. We can control the power levels between a minimum $E_v^{min,ev}$ and a maximum $E_v^{max,ev}$ power value, where $\phi_{t,v}^{ch}$ can take either the value 0 or between these lower and upper bounds. Since $E_v^{max,ev}$ has power units, it must be divided by N, the number of time intervals in which an hour is divided:

$$\frac{E_v^{min,ev}}{N} \leq \phi_{t,v}^{ch} \leq \frac{E_v^{max,ev}}{N} \quad OR \quad \phi_{t,v}^{ch} = 0 \qquad \forall\ v \in V^v, i \in I^{ev}, t \in T \tag{1}$$

For each EV shift interval i, the sum energy volume delivered to the vehicle unit must equal the sum of the baseline forecast:

$$\sum_{t=T_{i,v}^{start,ev}}^{T_{i,v}end,ev} \phi_{t,v}^{ch} = \sum_{t=T_{i,v}^{start,ev}}^{T_{i,v}end,ev} W_{t,v}^{ev} \qquad \forall\ v \in V, i \in I^{ev}, t \in [T_{i,v}^{start,ev}, T_{i,v}^{end,ev}) \tag{2}$$

For shiftable volume electric vehicles, we introduce the concept of weighted average delay. It takes into account not only when you meet the finale energy volume, but also how you do it: it is penalized more if large volumes of energy are shifted far away from the baseline. The weighted average delay for charging point v and EV shift interval i is defined as:

$$\tau_{i,v}^{ev} = \frac{\sum_{t=T_{i,v}^{start,ev}}^{T_{i,v}end,ev} ((\phi_{t,v}^{ch} - W_{t,v}^{ev}) \cdot K_{i,v,t}^{aux,ev})}{\sum_{t=T_{i,v}^{start,ev}}^{T_{i,v}end,ev} W_{t,v}^{ev}} \qquad \forall\ v \in V, i \in I^{ev} \tag{3}$$

Since this weighted average delay also may be negative (by shifting volume backwards), a new variable $\rho_{i,v}^{ev}$ is introduced, defined as:

$$\rho_{i,v}^{ev} \geq \tau_{i,v}^{ev} \qquad \forall\ v \in V, i \in I^{ev}, t \in [T_{i,v}^{start,ev}, T_{i,v}^{end,ev}) \tag{4}$$

$$\rho_{i,v}^{ev} \geq -\tau_{i,v}^{ev} \qquad \forall\ v \in V, i \in I^{ev}, t \in [T_{i,v}^{start,ev}, T_{i,v}^{end,ev}) \tag{5}$$

The total cost for shifting volume interruptible EV is:

$$\zeta^{ev} = \sum_{i \in I^{ev}} \sum_{v \in V} P_v^{ev} \cdot \rho_{i,v}^{ev} \qquad \forall\ v \in V, i \in I^{ev} \tag{6}$$

2.2 Energy Storage System constraints

Batteries are one of the keys to provide flexibility since they can supply up and down regulation by discharging or charging storage units. It can be said that batteries make easier to follow the variable and flashing renewable generation.

With the aim to represent a real and accurate model, the mathematical formulation has into account efficiency factors for storing and delivering electricity.

The variable $\sigma_{t,b}^{soc}$ serves to know the current energy state of a battery in use. The following equation 7 formulates the battery behaviour:

$$\sigma_{t,b}^{soc} = \sigma_{t-1,b}^{soc} + \sigma_{t,b}^{ch} \cdot A_b^{ch} - \frac{\sigma_{t,b}^{dis}}{A_b^{dis}} \qquad \forall b \in B, t \in T \tag{7}$$

The initial and final state of charge are defined

$$\sigma_{t,b}^{soc} = \sigma_b^{socinit} \qquad \forall b \in B, t = 0 \tag{8}$$

$$\sigma_{t,b}^{soc} = \sigma_b^{socend} \qquad \forall b \in B, t = T \tag{9}$$

In order to preserve the battery life-time [3], the state of charge must be between a minimum O_b^{min} and a maximum O_b^{max} energy limit value that can not be exceeded:

$$O_b^{min} \leq \sigma_{t,b}^{soc} \leq O_b^{max} \qquad \forall b \in B, t \in T \tag{10}$$

Equations 11 and 12 limit the maximum energy charged and discharged by battery per period.

$$\sigma_{t,b}^{ch} \leq \frac{Q_b^{ch}}{N} \qquad \forall b \in B, t \in T \tag{11}$$

$$\sigma_{t,b}^{dis} \leq \frac{Q_b^{dis}}{N} \qquad \forall b \in B, t \in T \tag{12}$$

The following constraint makes sure that the energy charged $\sigma_{t,b}^{ch}$ is linearly decreased.

$$\sigma_{t,b}^{ch} \leq \frac{-Q_b^{ch}}{1 - S_b^{ch}} \cdot \left(\frac{\sigma_{t,b}^{soc}}{O_b^{max}} - 1\right) \qquad \forall b \in B, t \in T \tag{13}$$

The same happens for discharging energy. The lower threshold to limit the energy output is S_b^{dis}.

$$\sigma_{t,b}^{dis} \leq \frac{Q_b^{dis}}{S_b^{dis}} \cdot \frac{\sigma_{t,b}^{soc}}{O_b^{max}} \qquad \forall b \in B, t \in T \tag{14}$$

Battery degradation [24] is an important issue to have in mind. In this formulation, the degradation cost for charging, shown in equation 15, is taken into account. The discharged degradation cost is already included in the charging process. To set this constant cost, the rainbow algorithm developed by [24] is used as a basis.

$$\zeta^{bat} = \sum_{t \in T} \sum_{b \in B} P_b^{b,ch} \cdot \sigma_{t,b}^{ch} \qquad \forall b \in B, t \in T \tag{15}$$

2.3 Load unit constraints

Loads can be uncontrolable, as inflexible load units, or controllable. This work focues on the flexible appliances. The characteristics of each one of the load models will be explained below.

Inflexible load unit These appliances are uncontrollable loads and they are supposed to run with the highest priority and without any delay. Typically, inflexible appliances include fridge, lights, TV, etc., which are considered as must run loads and can not be shifted to later hours or curtailed. These appliances do not participate in demand response [20].

$$\omega_{t,l}^{load,i} = W_{t,l}^{load,i} \qquad \forall \ l \in L^i, t \in T \tag{16}$$

Curtailable disconectable load unit In the present model, the baseline consumption is can be interrupted completely and no recovery is possible afterwards.

The equation 17 enunciates that a curtailment can not start, run and end at the same period:

$$\delta_{t,l}^{start,d} + \delta_{t,l}^{run,d} + \delta_{t,l}^{end,d} \leq 1 \qquad \forall\ l \in L^d, t \in T \tag{17}$$

A curtailment that starts or runs in one period, must either continue to run or end in the next period:

$$\delta_{t-1,l}^{start,d} + \delta_{t-1,l}^{run,d} = \delta_{t,l}^{start,d} + \delta_{t,l}^{run,d} \qquad \forall\ l \in L^d, t \in T \tag{18}$$

In the first period, $\delta_{t,l}^{run,d}$ and $\delta_{t,l}^{end,d}$ can never be set to 1, because $\delta_{t,l}^{start,d}$ must be activated first:

$$\delta_{0,l}^{run,d} = 0 \qquad \forall\ l \in L^d, t \in T \tag{19}$$

$$\delta_{0,l}^{end,d} = 0 \qquad \forall\ l \in L^d, t \in T \tag{20}$$

With the objective of maintaining the end-user comfort between certain levels, a load unit can not be curtailed any longer than $D_l^{max,d}$ periods,

$$\sum_{t+1}^{t+D_l^{max,d}} \delta_{t,l}^{end,d} \geq \delta_{t,l}^{start,d} \qquad \forall\ l \in L^d, t \in T \tag{21}$$

A minimum duration $D_l^{min,d}$ must exist between two load curtailments. The present constraint has also to do with the prosumer comfort:

$$\delta_{t,l}^{end,d} + \sum_{t+1}^{t+D_l^{min,d}} \delta_{t,l}^{start,d} \leq 1 \qquad \forall\ l \in L^d, t \in T \tag{22}$$

For disconnectable loads units, the load schedule that has been curtailed $\chi_{t,l}^{load,d}$ must be either 0 or equal to the baseline profile.

$$\chi_{t,l}^{load,d} = (\delta_{t,l}^{start,d} + \delta_{t,l}^{run,d}) \cdot W_{t,l}^{load,d} \qquad \forall\ l \in L^d, t \in T \tag{23}$$

The final amount of electricity consumed $\omega_{t,l}^{load,d}$ from load l during period t is:

$$\omega_{t,l}^{load,d} = W_{t,l}^{load,d} - \chi_{t,l}^{load,d} \qquad \forall\ l \in L^d, t \in T \tag{24}$$

The cost for curtailing the appliances consumption is formulated as follows:

$$\zeta^{load,d} = \sum_{t \in T} \sum_{l \in L^d} P_l^{load,d} \cdot (\delta_{t,l}^{start,d} + \delta_{t,l}^{run,d}) \qquad \forall\ l \in L^d, t \in T \tag{25}$$

Curtailable reducible load unit These load units can be reduced down to a certain level without switching off. The approach is the same as in the curtailable disconnectable load units, except the following constraint:

$$\chi_{t,l}^{load,r} \leq (\delta_{t,l}^{start,r} + \delta_{t,l}^{run,r}) \cdot W_{t,l}^{load,r} \qquad \forall\ l \in L^r, t \in T \tag{26}$$

The cost for reducing the power of the appliances is formulated as follows:

$$\zeta^{load,r} = \sum_{t \in T} \sum_{l \in L^r} P_l^{load,r} \cdot (\delta_{t,l}^{start,r} + \delta_{t,l}^{run,r}) \qquad \forall\ l \in L^r, t \in T \tag{27}$$

Shiftable profile load unit The total load must always be met, but it may be moved within a given time interval. Consumption is postponed, but keeping the same baseline profile.

A three dimension variable $\gamma_{i,l,n}$ is introduced, which is set to 1 if consumption for load unit l is shifted n periods for load shift interval i. Exactly one load shifting option must be selected for each shiftable profile load unit l in each load shift interval i,

$$\sum_{n=T_{i,l}^{start,p}-V_{i,l}^{start,p}}^{T_{i,l}^{end,p}-V_{i,l}^{end,p}} \gamma_{i,l,n} = 1 \qquad \forall\ l \in L^p, i \in I^p, t \in T \tag{28}$$

The consumption forecast must be allocated to the correct periods according to the decided load shifting option

$$\begin{aligned} \omega_{t,l}^{load,p} = & \sum_{n=0}^{T_{i,l}^{end,p}-T_{i,l}^{start,p}} \gamma_{i,l,(t-T_{i,l}^{start,p}-n)} \cdot W_{(T_{i,l}^{start,p}+n),l}^{load,p} \\ & \forall l \\ & \in L^p, i \\ & \in I^p, t \\ & \in [T_{i,l}^{start,p}, T_{i,l}^{end,p}) \end{aligned} \tag{29}$$

The cost for shifting a load is the product of the delay cost and the number of period delayed. We calculate this cost according to the equation below:

$$\zeta^{load,p} = \sum_{i \in I^p} \sum_{l \in L^p} P_l^{load,p} \sum_{n=0}^{T_{i,l}^{end,p}-V_{i,l}^{end,p}} \gamma_{i,l,n} \cdot n \qquad \forall\ l \in L^p, i \in I^p, t \in [T_{i,l}^{start}, T_{i,l}^{end}) \tag{30}$$

Shiftable volume load unit This flexible model follows exactly the same EV model equations, already explained before.

For each load shift interval i the sum energy volume delivered to the load unit must equal the sum baseline forecast:

$$\sum_{t=T_{i,l}^{start,v}}^{T_{i,l}^{end,v}} \omega_{t,l}^{load,v} = \sum_{t=T_{i,l}^{start,v}}^{T_{i,l}^{end,v}} W_{t,l}^{load,v} \qquad \forall\ l \in L^v, i \in I^v, t \in [T_{i,l}^{start,v}, T_{i,l}^{end,v}) \tag{31}$$

The total cost for shifting volume interruptible load is as follows:

$$\zeta^{load,v} = \sum_{i \in I^v} \sum_{l \in L^v} P_l^{load,v} \cdot \rho_{i,l}^{load} \qquad \forall\ l \in L^v, i \in I^v \tag{32}$$

2.4 PV generation constraints

Two types of PV generation models are considered.

PV disconnectable generation The scheduled production must be either 0 or equal to predicted production $W_{t,g}^{gen,d}$:

$$\psi_{t,g}^{gen,d} = \delta_{t,g}^{gen,d} \cdot W_{t,g}^{gen,d} \qquad \forall\ g \in G^d, t \in T \tag{33}$$

The cost $P_g^{gen,d}$ depends on the amount of energy that has been curtailed. Since renewable energy and self-consumption is a high priority, this cost for disconnecting the PV generation should be very high, so HEMS will never disconnect it as a first option.

$$\zeta^{gen,d} = \sum_{t \in T} \sum_{g \in G^d} P_g^{gen,d} \cdot (W_{t,g}^{gen,d} - \psi_{t,g}^{gen,d}) \qquad \forall\ g \in G^d, t \in T \tag{34}$$

PV reducible generation Scheduled production must be between 0 and predicted production:

$$0 \leq \psi_{t,g}^{gen,r} \leq W_{t,g}^{gen,r} \qquad \forall\ g \in G^r, t \in T \tag{35}$$

The total cost for reducing generation volume is:

$$\zeta^{gen,r} = \sum_{t \in T} \sum_{g \in G^r} P_g^{gen,r} \cdot (W_{t,g}^{gen,r} - \psi_{t,g}^{gen,r}) \qquad \forall\ g \in G^r, t \in T \tag{36}$$

2.5 HEMS objective function

Prosumers can purchase and sell energy from/to the grid. The objective is to minimize the electricity bill of each prosumer individually without incurring in a high discomfort for the end-user. The objective function formulated in equation 37 has into account the total cost of buying electricity from the grid, the revenues for selling electricity back to the grid and the discomfort cost for activating flexibility.

$$min \;\; o.f. = \sum_{t \in T} (P_t^{retail,buy} \cdot \chi_t^{buy}) \cdot P^{taxes} - \sum_{t \in T} (P^{retail,sell} \cdot \chi_t^{sell}) + discomfort \tag{37}$$

The discomfort term is the total cost for using the flexibility from the house internal resources. This cost covers a wide variety of costs, such as: loss of comfort from shifting and curtailing loads and dis-utility from delaying EV charging session:

$$discomfort = \zeta^{bat} + \zeta^{ev} + \zeta^{gen,d} + \zeta^{gen,r} + \zeta^{load,d} + \zeta^{load,r} + \zeta^{load,p} + \zeta^{load,v} \tag{38}$$

2.6 Market tariff constraints

The total electricity imported from the grid χ_t^{buy} and the total electricity exported to the grid χ_t^{sell}, must balance the production from generation units, consumption from load units, charging and discharging batteries and EV charging sessions for each period of time $t \in T$:

$$\begin{aligned} &\sum_{g \in G^d} \psi_{t,g}^{gen,d} + \sum_{g \in G^r} \psi_{t,g}^{gen,r} + \sum_{b \in B} \sigma_{t,b}^{dis} + \chi_t^{buy} \\ &= \chi_t^{sell} + \sum_{b \in B} \sigma_{t,b}^{ch} + \sum_{v \in V} \phi_{t,v}^{ch} + \sum_{l \in L^d} \omega_{t,l}^{load,d} \\ &\quad + \sum_{l \in L^p} \omega_{t,l}^{load,p} + \sum_{l \in L^r} \omega_{t,l}^{load,r} + \sum_{l \in L^v} \omega_{t,l}^{load,v} \forall \;\; t \\ &\in T \end{aligned} \tag{39}$$

Binary variables δ_t^{buy} and δ_t^{sell} are now introduced in order to ensure that it is not possible to sell and buy electricity in the same period. They are set to 1 if the customer is buying (importing) or selling (exporting); else 0:

$$\delta_t^{buy} + \delta_t^{sell} \leq 1 \qquad \forall \;\; t \in T \tag{40}$$

Electricity bought and sold must be less or equal to the contracted power of each prosumer, according to the terms stipulated in the retail contract:

$$\chi_t^{buy} \leq \delta_t^{buy} \cdot X^{max,imp} \qquad \forall \;\; t \in T \tag{41}$$

$$\chi_t^{sell} \leq \delta_t^{sell} \cdot X^{max,exp} \qquad \forall \;\; t \in T \tag{42}$$

3 Case Studies

In this section the assumptions for a proper and realistic operation of the HEMS are defined along with the case studies definition.

Two case studies are presented. Restrictions and assumptions commonly found in both are described. The first case study aims to explain a simple scenario of a single prosumer that is allowed to buy and sell electricity to the grid, so the reader is able to understand and verify the operation of the HEMS easily. The second focuses on analyzing the behavior of a Local Energy Comunity (LEC) formed by ten prosumers, which will also aim at minimizing their total electric cost individually.

For the purpose of making the case studies as realistic as possible, real load and EV consumption and PV generation data from real dwellings is used as an input to the HEMS performance. These parameters are taken from DataPort database [4].

The temporal horizon used in the HEMS simulation is 24 hours. Each simulation time interval is 15 minutes long, making a total of 96 time-slots. In all case studies it is assumed that the starting period (t = 0) is at 6 am and it ends at 5:45 am of the following day. This schedule allows to shift a EV charging session at night and play with the low prices at that time.

The proposed two scenarios take place on July 22th of 2017, the hottest day of the year 2017. This day has been chosen since it is when the electricity consumption is higher, because of the use of air conditioning.

Batteries begin and end at approximately half their maximum capacity. This restriction is imposed because otherwise batteries would be completely discharged at the end of the time horizon, leaving them with no stored energy for the next day. Electric vehicles are just allowed to charge and each prosumer has its own PV panels.

The Spanish tariff market is applied in the HEMS simulation. The electricity tariff chosen for buying electricity from the grid is the PVPC tariff (Precio Voluntario para el Pequeo Consumidor): this price changes hourly and daily demanding on the balance of supply-demand between whoever is producing energy (the generation company) and whoever is selling this energy to consumers (retailers). All prosumers must have a contract power lower than 10 kW because of regulations. The PVPC hourly electricity prices used in this project are real data from the day 22th-23th of July, from 06:00 am to 05:59 am of the following day.

It is necessary to establish a solid baseline to set the sale price of the electricity. The electricy price of the day-ahead market published by OMIE (Operador del Mercado Ibrico de Energa) [16] of the last two years has been used as reference in order to obtain an indicative electricity sale value (See Figure **??**). To avoid falling into euphoric results, we have chosen a sale electricity price a bit below the inter-annual average value.

Therefore, the price for selling energy P^{sell} is set in 4 c€/kWh and it is a constant value for all time slots and prosumers. Battery can also inject energy to the grid.

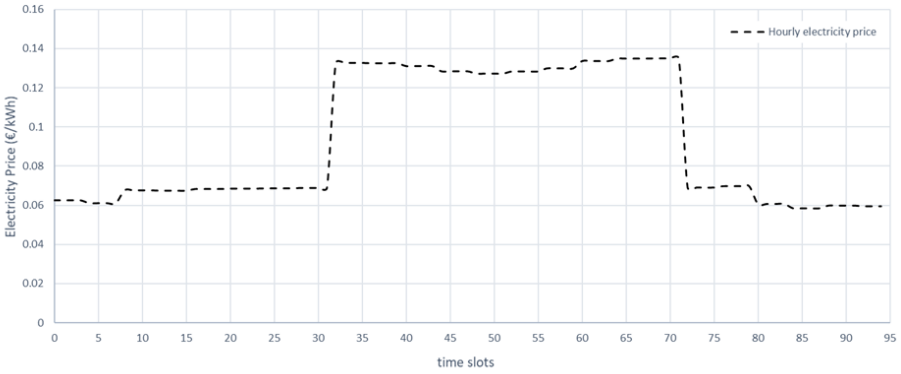


Fig. 1. PVPC tariff. Hourly electricity price (July 22th to 23th, 2017)

4 Results

This section demonstrates the applicability of the developed HEMS algorithm for residential customers. The results of the two case studies are presented.

4.1 Case Study 1: One prosumer

The solution was obtained with a computational time of 1,14793 seconds on a Laptop with a processor core i7 at 2,60 GHz and 8 GB of RAM.

The prosumer is allowed to sell electricity back to the grid in exchange for economic compensation, as well as buy when necessary to meet the optimal energy balance.

The the objective function solution is the minimized energy cost, which is showed in the following Table 1. Two cost are compared: Prosumer baseline energy cost versus the optimized total cost. It must be noted that the baseline cost do not have batteries in its system, just PV generation. This cost can be defined as the energy bill that the prosumer would have to pay if he had not flexible assets, having the same consumption and generation profile.

Table 1. One prosumer. Total cost comparison

	Baseline cost	Optimized cost	Electricity bill reduction
Prosumer	9,66 €	8.52 €	11.82 %

The HEMS results are displayed in Figure 3. The total amount of energy needed to be bought and sold, the PV generation, the battery performance and the total consumption (loads and EV) are shown. Let's take a look at the behavior of the battery: on the one hand, it discharges mostly during the highest

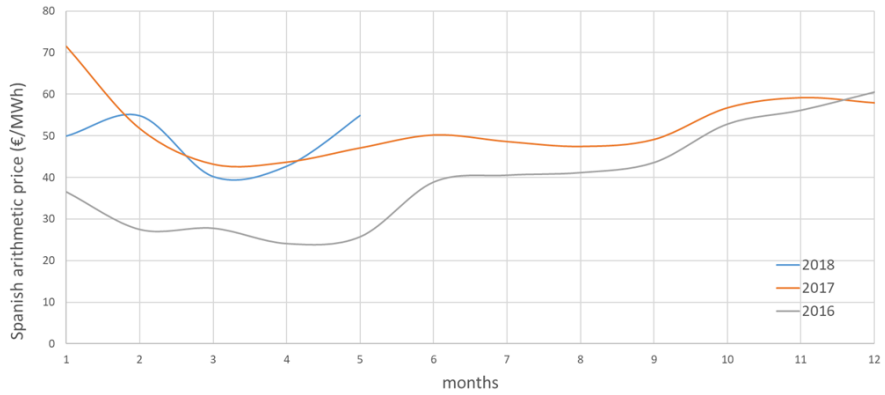


Fig. 2. Electricity price monthly average of the day-ahead Spanish market in the last two years

energy prices periods. On the other, the battery charges when the electricity price is the cheapest and when there is a PV surplus of energy generation and instead of reducing that clean and cost-zero energy, the battery charges in order to inject electricity afterwards during the expensive price energy periods. Also, the largest purchase of energy occurs when there is no solar radiation.

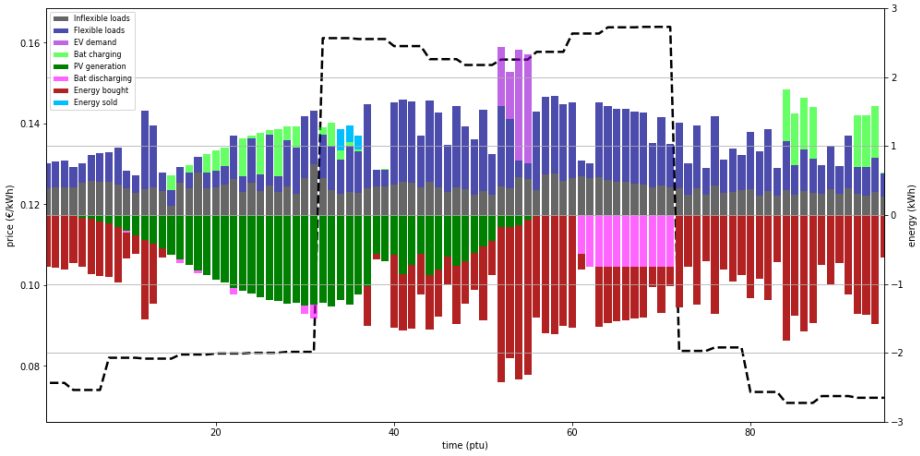


Fig. 3. HEMS detailed results

EV charging point profile has shifted and grouped its volume from expensive to a little less expensive periods. As it has been pointed out before, there is an

associated shifting cost that has to do with the end-user discomfort. This is why EV is not shifted further to period 72, where electricity is cheaper, because it would ultimately be more expensive due to EV charging session would have to be shifted at least 14 periods from the baseline. So EV charging point groups as much as possible the charging EV volume to the lower prices, without exceeding the maximum charging power: 8,8 kW.

From Figure 3 the following conclusions are drawn: It is noticeable that the total amount of energy sold is negligible. The entire electricity sold takes place after period 34, right at the moment when the battery reaches its maximum capacity: 10 kWh.. Battery can never exceed that maximum SOC in no case and under no circumstances: Figure 4 corroborates it.

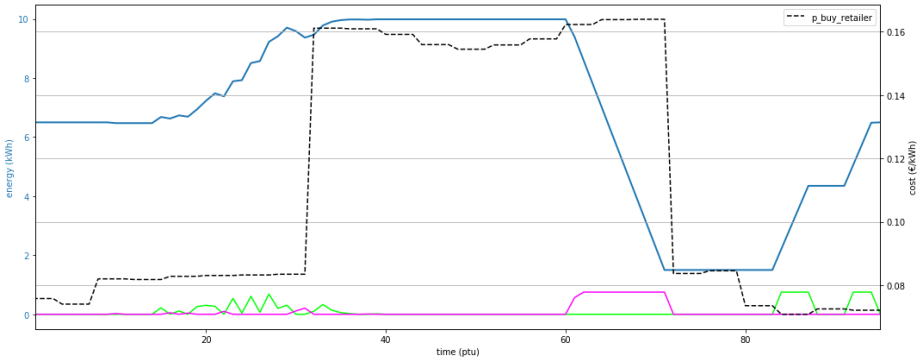


Fig. 4. HEMS battery performance

Total flexibility activated The total amount of flexibility activated by the flexible sources is represented in Figure 5. Positive flexibility means up regulation and negative, down regulation. That explanation is schematically summarized in Table 2.

Table 2. Flexibility definition

Positive Flexibility	**Negative Flexibility**
↑ generation	↓ generation
↓ consumption	↑ consumption
battery discharging	battery charging

Positive flexibility happens mainly during time intervals with high electricity purchase prices, on the other hand, negative flexibility occurs during low electricity prices. This make sense since prosumer aims to reduce his electricity

bill, so the consumption decreases and instead of buying electricity to the grid, batteries discharge in order to provide that energy needed to meet the energy balance.

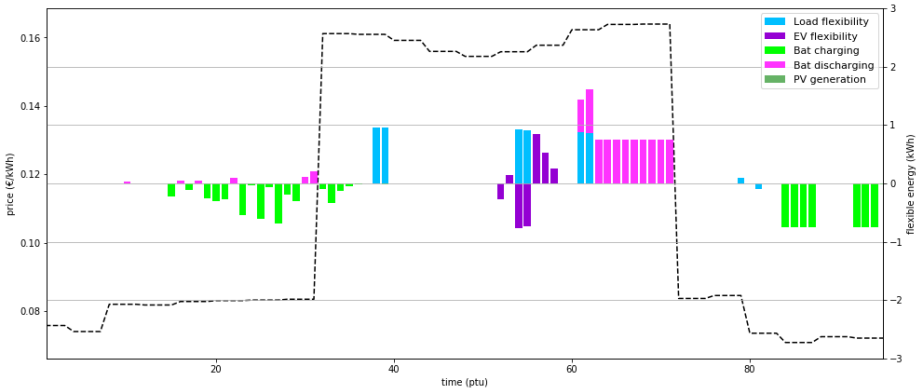


Fig. 5. HEMS total flexibility activated

4.2 Case Study 2: LEC

This case brings together 10 prosumers, all of them with EV, photovoltaic generation, two air conditioning units, batteries, flexible and inflexible loads. These ten prosumers form a LEC. The objective is to check the distribution grid behavior under the following condition: each prosumer wants to reduce its own electricity bill. In order to give that individual prosumer flexibility service, each house is optimized separately. Once all the individual results are obtained, they are all add up to have the total amount of energy purchased, sold, PV generation and batteries operation. The graphs will only show the sum total of all the individual household results.

The average reduction of the total cost of the total invoice for the LEC is shown in Table 3.

Table 3. LEC. Total cost comparison

	Baseline cost	Optimized cost	Electricity bill reduction
LEC	118,09 €	92,83 €	21,39 %

The following Figure 6 represents all the energy sources that provide electricity to the LEC: the total energy bought and sold from/to the grid, batteries performance and the total renewable photovoltaic generation. The total amount of electricity sold is negligible.

It is interesting to see how in the same period, some batteries charge and other discharge. This is due to many factors: battery capacity, consumption pattern, PV generation output power, etc. LEC batteries discharge mostly during the most expensive electricity price periods: from 60 to 71. Also, before reaching the end of the planning horizon, batteries take advantage to charge during electricity prices in order to finish with the same SOC that they started.

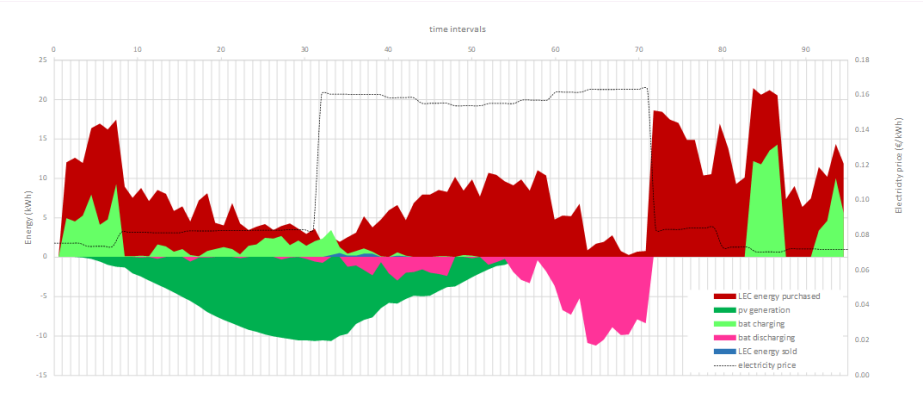


Fig. 6. LEC HEMS results

The highest peak purchase occurs during the time slots where the purchased price of electricity is low. Due to the objective function seeks to minimize the total energy cost of each prosumer, it makes sense that in periods where electricity is more expensive, the amount of energy purchased will be less in order to save money. In fact, the minimum amount of energy purchased is just in the time interval where the cost of energy has its maximum and right after, when prices decreases, the LEC buys energy in order to charge EVs and batteries. This situation will produce a rebound effect in the system, since it goes from a minimum to almost a maximum peak in the distribution system energy demand.

It is also observed that during the periods when there is solar radiation, exactly from 5 to 59 time interval, the power purchase is low, since load consumption is mainly fed by photovoltaic generation.

It is interesting to observe how the HEMS has re-scheduled the EV charging sessions. Figure 7 displays de EV consumption baseline and the EVs consumption after the HEMS performance. The EV discomfort cost for shifting the charging session is different for each prosumer. For example, prosumer 5 has a high EV discomfort cost, so the EV consumption can not be shifted far away. EVs with a low discomfort cost can be shifted more number of periods in order to save money. Most of the EV charging sessions have been moved towards periods where the price of electricity is low. There is a clear tendency to group the volume of the EVs and shift them towards periods that are cheaper than the EV baseline.

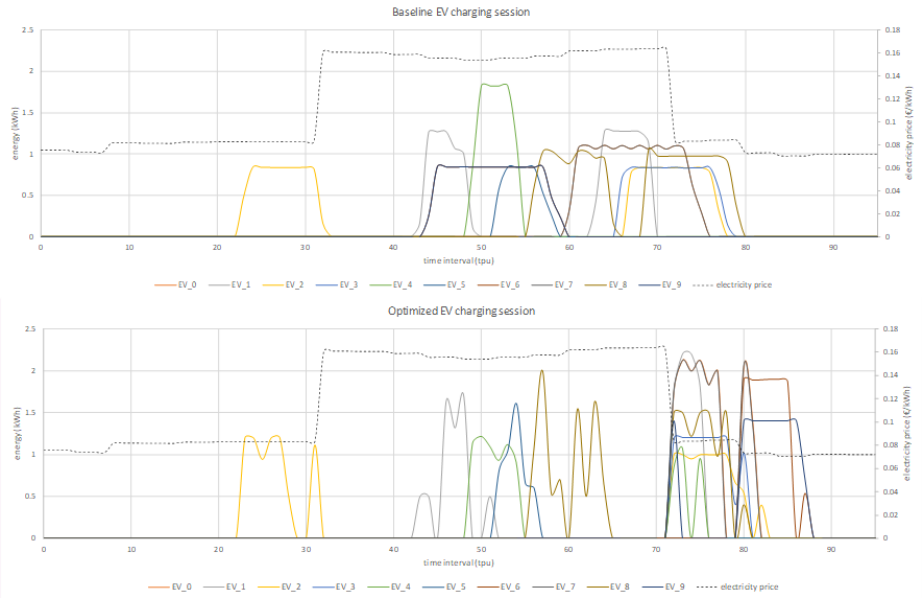


Fig. 7. EV baseline and optimized charging session

5 Conclusions

The integration of the Distributed Energy Resources (DER) into the electrical system directly implies an increase in the self-consumption of the electrical energy in the households that own that renewable resource. As a direct consequence, this trend generates, as it has already been proven in this work, a high variable and intermittent power purchase to the grid.

Furthermore, the prosumer flexibility service, which only seeks the individual benefit, brings even more problems related to the stability and quality of the electrical supply.

From this work, the following conclusions can be drawn:
The sale price of electricity used in the Spanish market context is not high enough to prioritize that sale, instead, charging batteries is a priority in order to discharge them during periods where the electricity price is high. Selling back to the grid will only be worth it when the batteries have already reached their maximum capacity. Also, it can be affirmed that the total electricity cost has been reduced in all individual prosumer optimization. Batteries are a key flexibility asset.

Acknowledgment

This work has been supported by the INVADE H2020 project (2017–2019), which has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation program under Grant Agreement No. 731148.

A Sets, parameters and variables

Sets

B	Set of battery units
G	Set of generation units
G^d	Subset of generation units that are curtailable disconnectable
G^r	Subset of generation units that are curtailable reducible
I	Set of shift intervals
I^{ev}	Subset of electric vehicles interval
I^p	Subset of load shiftable profile intervals
I^v	Subset of load shiftable volume intervals
L	Set of load units
L^i	Subset of load units that are inflexible
L^d	Subset of load units that are curtailable and disconnectable
L^r	Subset of load units that are curtailable and reducible
L^p	Subset of load units that are shiftable profile
L^v	Subset of load units that are shiftable volume
T	Set of periods in the planning horizon
V	Set of EVs charging points

Parameters

A_b^{ch}	Efficiency parameter for charging battery unit $b \in B$
A_b^{dis}	Efficiency parameter for discharging battery unit $b \in B$
$D_l^{max,d}$	Maximum duration of a regulation for load unit $l \in L^d$
$D_l^{min,d}$	Minimum rest time between two regulations for load unit $l \in L^d$
$D_l^{max,r}$	Maximum duration of a regulation for load unit $l \in L^r$
$D_l^{min,r}$	Minimum rest time between two regulations for load unit $l \in L^r$
$E_v^{max,ev}$	Maximum charging power allowed for charging point $v \in V$ [kWh]
$E_l^{max,v}$	Maximum charging power allowed for load unit $l \in L^v$ [kW]
$E_v^{min,ev}$	Minimum charging power allowed for charging point $v \in V$ [kW]
$E_l^{min,v}$	Minimum charging power allowed for load unit $l \in L^v$ [kW]
$K_{t,v,i}^{aux,ev}$	Parameter to penalize shifting charging volume in charging point $v \in V$ in shift interval $i \in I^{ev}$ during period $t \in T$
$K_{t,l,i}^{aux,v}$	Parameter to penalize shifting charging volume of load $l \in L^v$ in shift interval $i \in I^v$ during period $t \in T$
$N_l^{max,d}$	Maximum number of regulations for load unit $l \in L^d$ in the planing horizon
$N_l^{max,r}$	Maximum number of regulations for load unit $l \in L^r$ in planing horizon
O_b^{min}	Minimum state of charge allowed for battery $b \in B$ [kWh]
O_b^{max}	Maximum state of charge allowed for battery $b \in B$ [kWh]
$P_b^{b,ch}$	Degradation price for charging battery unit $b \in B$ [€/kWh]
$P_g^{gen,d}$	Price for disconnecting generation unit $g \in G^d$ [€/kWh]

$P_g^{gen,r}$ Price for reducing the output power of generation unit $g \in G^r$ [€/kWh]
$P_l^{load,d}$ Price for disconnecting load unit $l \in L^d$ [€/kWh]
$P_l^{load,p}$ Price for shifting consumption for shiftable profile load unit $l \in L^p$ [€/kWh]
$P_l^{load,r}$ Price for reducing consumption for curtailable load unit $l \in L^r$ [€/kWh]
$P_l^{load,v}$ Price for shifting volume consumption for shiftable volume load unit $l \in L^v$ [€]
$P_t^{retail,buy}$ Price for purchasing electricity from the grid in period $t \in T$ [€/kWh]

P^{taxes} Electricity bill VAT tax. Constant parameter
$P^{retail,sell}$ Price for selling electricity back to the grid [€/kWh]

P_v^{ev} Price for shifting volume for charging point $v \in V$ with 1 kWh [€]
Q_b^{ch} Maximum charging power allowed for battery unit $b \in B$ [kW]
Q_b^{dis} Maximum discharging power allowed for battery unit $b \in B$ [kW]
S_b^{ch} Threshold in charging process for battery unit $b \in B$
S_b^{dis} Threshold in discharging process for battery unit $b \in B$
$\sigma_b^{SOC,init}$ Energy stored in battery unit $b \in B$ at the beginning of the planing horizon [kWh]
$\sigma_b^{SOC,end}$ Energy stored in battery unit $b \in B$ at the end of the planning horizon [kWh]
$T_{i,v}^{start,ev}$ First period in EV shift interval $i \in I^{ev}$ in charging point $v \in V$
$T_{i,l}^{start,p}$ First period in load shift interval $i \in I^p$ and load unit $l \in L^p$
$T_{i,l}^{start,v}$ First period in load shift interval $i \in I^v$ and load unit $l \in L^v$
$T_{i,v}^{end,ev}$ Last period in EV shift interval $i \in I^{ev}$ in charging point $v \in V$
$T_{i,l}^{end,p}$ Last period in load shift interval $i \in I^p$ and load $l \in L^p$
$T_{i,l}^{end,v}$ Last period in load shift interval $i \in I^v$ and load l
$V_{i,v}^{start,ev}$ First period in charging point shift interval $i \in I^{ev}$ where the vehicle unit $v \in V$ has a baseline consumption
$V_{i,l}^{start,p}$ First period in load shift interval $i \in I^p$ where the load unit $l \in L^p$ has a baseline consumption
$V_{i,l}^{start,v}$ First period in load shift interval $i \in I^v$ where the load unit $l \in L^v$ has a baseline consumption
$V_{i,v}^{end,ev}$ Last period in charging point shift interval $i \in I^{ev}$ where the charging point $v \in V$ has a baseline consumption
$V_{i,l}^{end,p}$ Last period in load shift interval $i \in I^p$ where the load unit $l \in L^p$ has a baseline consumption
$V_{i,l}^{end,v}$ Last period in load shift interval $i \in I^v$ where the load unit $l \in L^v$ has a baseline consumption
$W_{t,g}^{gen,d}$ Baseline generation of electricity from generation unit $g \in G^d$ in period $t \in T$ [kWh]
$W_{t,g}^{gen,r}$ Baseline generation of electricity from generation unit $g \in G^r$ in period $t \in T$ [kWh]

$W_{t,v}^{ev}$	Baseline charging schedule for charging point $v \in V$ during period $t \in T$ [kWh]
$W_{t,l}^{load,d}$	Baseline consumption of load unit $l \in L^d$ in period $t \in T$ [kWh]
$W_{t,l}^{load,i}$	Baseline consumption of inflexible load unit $l \in L^i$ in period $t \in T$ [kWh]
$W_{t,l}^{load,p}$	Baseline consumption at load unit $l \in L^p$ in period $t \in T$ [kWh]
$W_{t,l}^{load,r}$	Baseline consumption of load unit $l \in L^r$ in period $t \in T$ [kWh]
$W_{t,l}^{load,v}$	Baseline consumption of load unit $l \in L^v$ during period $t \in T$ [kWh]
$X^{max,exp}$	Maximum exported power allowed to the grid [kW]
$X^{max,imp}$	Contracted power. Maximum power allowed by contract to import from the grid [kW]

Variables

δ_t^{buy}	Binary variable that is set to 1 if site is importing/buying electricity from the grid in period $t \in T$
δ_t^{sell}	Binary variable that is set to 1 if site is exporting/selling electricity to the grid in period $t \in T$
$\delta_{t,g}^{gen,d}$	Binary variable equal to 0 if generation unit $g \in G^d$ is disconnected in period $t \in T$; else 0
$\delta_{t,l}^{start,d}$	Binary variable equal to 1 if regulation of load unit $l \in L^d$ ends in the beginning of period $t \in T$; else 0
$\delta_{t,l}^{start,r}$	Binary variable equal to 1 if regulation of load unit $l \in L^r$ in period $t \in T$; else 0
$\delta_{t,l}^{run,d}$	Binary variable equal to 1 if regulation of load unit $l \in L^d$ is running in period $t \in T$; else 0
$\delta_{t,l}^{run,r}$	Binary variable equal to 1 if regulation of load unit $l \in L^r$ is running in period $t \in T$; else 0
$\delta_{t,l}^{end,d}$	Binary variable equal to 1 if regulation of load unit $l \in L^d$ ends in the beginning of period $t \in T$; else 0
$\delta_{t,l}^{end,r}$	Binary variable equal to 1 if regulation of load unit $l \in L^r$ ends in the beginning of period $t \in T$; else 0
$\phi_{t,v}^{ch}$	Amount of electricity charged in charging point $v \in V^v$ in period $t \in T$ [kWh]
$\gamma_{i,l,n}$	Binary variable equal to 1 if consumption for load unit $l \in L^p$ is shifted n periods for load shift interval $i \in I^p$; else 0
$\psi_{t,g}^{gen,d}$	Amount of electricity produced from generation unit $g \in G^d$ in period $t \in T$ [kWh]
$\psi_{t,g}^{gen,r}$	Amount of electricity produced from generation unit $g \in G^r$ in period $t \in T$ [kWh]
$\rho_{i,v}^{ev}$	Help variable to handle positive and negative values of $\tau_{i,v}^{ev}$ in charging point $v \in V^v$ in shift interval $i \in I^{ev}$

$\rho_{i,l}^{load}$	Help variable to handle positive and negative values of $\tau_{i,l}^{load,v}$ in load $l \in L^v$ in shift interval $i \in I^v$
$\sigma_{t,b}^{ch}$	Amount of electricity charged to battery unit $b \in B$ in period $t \in T$ [kWh]
$\sigma_{t,b}^{dis}$	Amount of electricity energy discharged to battery unit $b \in B$ in period $t \in T$[kWh]
$\sigma_{t,b}^{SOC}$	Amount of electricity energy stored to battery unit $b \in B$ in period $t \in T$ [kWh]
$\tau_{i,v}^{ev}$	Weighted average delay for charging point $v \in V^v$ in interval $i \in I^{ev}$
$\tau_{i,l}^{load}$	Weighted average delay for shiftable volume load unit $l \in L^v$ in interval $i \in I^v$
$\omega_{t,l}^{load_p}$	Amount of electricity consumed from load unit $l \in L^p$ in period $t \in T$ [kWh]
$\omega_{t,l}^{load,v}$	Amount of electricity consumed from load unit $l \in L^v$ in period $t \in T$ [kWh]
χ_t^{buy}	Amount of electricity bought in period $t \in T$ [kWh]
χ_t^{sell}	Amount of electricity sold in period $t \in T$ [kWh]
$\chi_{t,l}^{load,d}$	Amount of energy reduced from load $l \in L^d$ in period $t \in T$ [kWh]
$\chi_{t,l}^{load,r}$	Amount of energy reduced from load $l \in L^r$ in period $t \in T$ [kWh]
$\zeta_{t,b}^{bat}$	Cost of charging batteries $b \in B$ in the time horizon $t \in T$ €
$\zeta_{t,v}^{ev}$	Cost of charging EV in charging point $v \in V^v$ in the time horizon $t \in T$ [€]
$\zeta_{t,g}^{gen,d}$	Total cost for disconnecting generation unit $g \in G^d$ in period $t \in T$ [€]
$\zeta_{t,g}^{gen,r}$	Total cost for reducing the power of generation unit $g \in G^r$ in period $t \in T$ [€]
$\zeta_{t,l}^{load,d}$	Cost for disconnecting load unit $l \in L^d$ in period $t \in T$ [€]
$\zeta_{t,l}^{load,r}$	Cost for curtailing reducible load unit $l \in L^r$ in period $t \in T$ [€]
$\zeta_{t,l}^{load,p}$	Cost for shifting load unit $l \in L^p$ in period $t \in T$ [€]
$\zeta_{t,l}^{load,v}$	Cost for shifting volume load unit $l \in L^v$ in period $t \in T$ [€]

References

[1] P. Lloret-Gallego P. Olivella-Rosell et al. *INVADE H2020 project: Overall INVADE architecture D4.1.* https://h2020invade.eu/deliverables/. [Online; accessed 2-Feb-2018]. 2018.

[2] Marc Beaudin and Hamidreza Zareipour. "Home energy management systems: A review of modelling and complexity". In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 45 (2015), pp. 318 –335. ISSN: 1364-0321. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.046. URL: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115000568.

[3] M. Castillo-Cagigal et al. "PV self-consumption optimization with storage and Active DSM for the residential sector". In: *Solar Energy* 85.9 (2011), pp. 2338 –2348. ISSN: 0038-092X. DOI: https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.06.028. URL: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X11002404.

[4] *DataPort Data Base*. https://dataport.cloud/. [Online; accessed 01-May-2018]. 2018.

[5] Onur Elma and Ugur Savas Selamogullari. "A new home energy management algorithm with voltage control in a smart home environment". In: *Energy* 91 (2015), pp. 720 –731. ISSN: 0360-5442. DOI: https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.08.094. URL: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544215011706.

[6] European Union. *Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council on common rules for the internal market in electricity*. 2017. URL: https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/1{_}en{_}act{_}part1{_}v7{_}864.pdf.

[7] Rebecca Ford et al. "Categories and functionality of smart home technology for energy management". In: *Building and Environment* 123 (2017), pp. 543 –554. ISSN: 0360-1323. DOI: https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.07.020. URL: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132317303062.

[8] Mohammad Ali Fotouhi Ghazvini et al. "Demand response implementation in smart households". In: *Energy and Buildings* 143 (2017), pp. 129 –148. ISSN: 0378-7788. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.03.020. URL: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037877881730823X.

[9] Aaron Hansen, Jason Staggs, and Sujeet Shenoi. "Security analysis of an advanced metering infrastructure". In: *International Journal of Critical Infrastructure Protection* 18 (2017), pp. 3 –19. ISSN: 1874-5482. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijcip.2017.03.004. URL: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1874548217300495.

[10] Nadeem Javaid et al. "A new heuristically optimized Home Energy Management controller for smart grid". In: *Sustainable Cities and Society* 34 (2017), pp. 211 –227. ISSN: 2210-6707. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.06.009. URL: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670717303074.

[11] Xin Jin et al. "Foresee: A user-centric home energy management system for energy efficiency and demand response". In: *Applied Energy* 205 (2017), pp. 1583 –1595. ISSN: 0306-2619. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.08.166. URL: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261917311856.

[12] K. Kok and S. Widergren. "A Society of Devices: Integrating Intelligent Distributed Resources with Transactive Energy". In: *IEEE Power and Energy Magazine* 14.3 (2016), pp. 34–45. ISSN: 1540-7977. DOI: 10.1109/MPE.2016.2524962.

[13] H. T. Nguyen, D. T. Nguyen, and L. B. Le. "Energy Management for Households With Solar Assisted Thermal Load Considering Renewable Energy and Price Uncertainty". In: *IEEE Transactions on Smart Grid* 6.1 (2015), pp. 301–314. ISSN: 1949-3053. DOI: 10.1109/TSG.2014.2350831.

[14] Pol Olivella-Rosell et al. "Local Flexibility Market Design for Aggregators Providing Multiple Flexibility Services at Distribution Network Level". In: *Energies* 11.4 (2018).

[15] Pol Olivella-Rosell et al. "Optimization problem for meeting distribution system operator requests in local flexibility markets with distributed energy resources". In: *Applied Energy* 210 (2018), pp. 881 –895. ISSN: 0306-2619. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.08.136. URL: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261917311522.

[16] *OMIE: precio del mercado diario*. http://www.omie.es/reports. [Online; accessed 17-June-2018]. 2018.

[17] M. Pipattanasomporn, M. Kuzlu, and S. Rahman. "An Algorithm for Intelligent Home Energy Management and Demand Response Analysis". In: *IEEE Transactions on Smart Grid* 3.4 (2012), pp. 2166–2173. ISSN: 1949-3053. DOI: 10.1109/TSG.2012.2201182.

[18] A. Vieira Pombo, J. Murta-Pina, and V. Ferno Pires. "Multiobjective formulation of the integration of storage systems within distribution networks for improving reliability". In: *Electric Power Systems Research* 148 (2017), pp. 87 –96. ISSN: 0378-7796. DOI: https://doi.org/10.1016/j.epsr.2017.03.012. URL: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779617301128.

[19] I. Bayram R. Jovanovic A. Bousselham. "Residential Demand Response Scheduling with Consideration of Consumer Preferences". In: *Applied Sciences* 6 (2016). URL: http://www.mdpi.com/2076-3417/6/1/16.

[20] R. Khalid S. Mehboob Hussain A. Zafar. "Complex, Intelligent, and Software Intensive Systems". In: (2017), pp. 163–174.

[21] Tohid Sattarpour, Daryoush Nazarpour, and Sajjad Golshannavaz. "A multi-objective HEM strategy for smart home energy scheduling: A collaborative approach to support microgrid operation". In: *Sustainable Cities and Society* 37 (2018), pp. 26 –33. ISSN: 2210-6707. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.09.037. URL: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670717308533.

[22] Mohammad Shakeri et al. "An intelligent system architecture in home energy management systems (HEMS) for efficient demand response in smart grid". In: *Energy and Buildings* 138 (2017), pp. 154 –164. ISSN: 0378-7788. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.026. URL: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778816318369.

[23] Guilherme de Oliveira e Silva and Patrick Hendrick. "Photovoltaic self-sufficiency of Belgian households using lithium-ion batteries, and its impact on the grid". In: *Applied Energy* 195 (2017), pp. 786 –799. ISSN: 0306-2619. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.03.112. URL: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261917303495.

[24] B. Xu et al. “Factoring the Cycle Aging Cost of Batteries Participating in Electricity Markets”. In: *IEEE Transactions on Power Systems* 33.2 (2018), pp. 2248–2259. ISSN: 0885-8950. DOI: 10.1109/TPWRS.2017.2733339.

[25] Rehman Zafar et al. “Prosumer based energy management and sharing in smart grid”. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 82 (2018), pp. 1675 –1684. ISSN: 1364-0321. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.07.018. URL: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117310894.

IoT-based Microseismic Monitoring System for the Evaluation of Structural Health in Smart Cities

Santiago González[1], Juan Carlos Jiménez[2,3], Remigio Guevara[3], Iván Palacios[3]

[1] Department of Electric, Electronic and Telecommunication Engineering
[2] Department of Civil Engineering, [3] Red Sísmica del Austro
Universidad de Cuenca, Av.12 de Abril, CP. 010203, Cuenca, Ecuador
santiago.gonzalezm, juan.jimenez, remigio.guevara,
ivan.palacios@ucuenca.edu.ec

Abstract. This paper presents the design and implementation of a prototype station, which aim to monitor microseismic events. The data collected by the sensors are used for detecting events on a specific zone, as well as for applications of structural health. The prototype was implemented using IoT devices (Internet of Things), such as MEMS accelerometers (Microelectromechanical Systems) and a single board computer with embedded Linux.
The station can be accessed remotely by means of a web application based on Node.js, which provides users with real time data. Moreover, the prototype has the capacity of getting information of geolocation as well as platform status (e.g. CPU load, temperature and energy consumption).
The main advantage of this proposal consists in the design of a solution based on open hardware architecture, open source, portability and low cost. Regarding the prototype evaluation, results show an appropriate operation, which represents the contribution of this work to the design of monitoring applications in the context of smart cities.

Keywords: Microseismic monitoring, Internet of Things, Structural health.

1 Introduction

Monitoring systems based on IoT technology (Internet of Thing) represent a current solution for the design of applications focused on capturing and processing physical variables. In particular, IoT-based systems allow the interconnection and cooperation between users, sensors and actuators.

Traffic monitoring systems, urban mobility management, environmental monitoring, emergency response systems, precision agriculture, among others, are some examples of applications [1]. These sorts of solutions contribute significantly to an urban development based on sustainability, security, and efficient resources management.

In this context, one of the most important applications is the monitoring and detection of natural events (e.g. seismic events), which can put both population and infra-

structures at risk. In fact, it is worth mentioning that earthquake prediction is an active research area.

Although it is not possible to predict exactly the location, magnitude and time for a next seismic event to occur in a region, the seismology research working along with computer sciences and information technologies has significantly contributed to improving the understanding of the seismic processes, especially with regard to the temporal characteristics, as is described in [2]. In this case, the prediction is based on the analysis of seismic indicators also called seismic precursors. Such indicators are useful in order to generate emergency alerts. A well-known example about the success achieved by means of an early warning system is the case of the earthquake occurred in Haicheng (China, 1977). Seismic activity changes were monitored during months along with changes in groundwater levels, then when unusual behaviors were detected, an alert was generated to the population, an action that saved the lives of hundreds of thousands of people. According to the estimations detailed in [3], the number of victims was reduced to 1%.

In regard to the seismic precursors, there are studies in the literature which describe a relationship between seismic events and indicators: changes in seismic waves behavior [4], electrical signals presents in the lithosphere [5], electromagnetic changes in the ionosphere [6], temperature variations detected in the lithosphere [7], changes in the concentration of carbon dioxide in volcanic regions [8], radon emissions from soil [9], human activities (e.g. mining) [10], [11] and even unusual behaviors in animals [12].

Therefore, the level of complexity for deploying a monitoring system depend on the type of seismic precursor used. In particular, the analysis of seismic wave patterns, i.e. the detection and characterization of seismic events, presents a real potential for research and development of future solutions. To this end, the proper operation of transducer devices is highly important. In this context, sensors such as geophones and accelerometers show great versatility in order to detect ground motions.

Moreover, when a set of monitoring stations, including these kinds of sensors, is deployed along a specific region, it is possible to obtain microseismic information which can be useful as an indicator of a great magnitude earthquake.

In this paper, we present the design and implementation of a prototype station for microseismic monitoring. This work has been carried out as a first step towards the deployment of a monitoring network. Also, recent technology has been considered in order to reduce significantly the cost per station.

The prototype was implemented using IoT devices (Internet of Things), such as MEMS accelerometers (Microelectromechanical Systems) and a single board computer (SBC) with embedded Linux. The station can be accessed remotely by means of a web application based on Node.js, which provides users with real time data. Moreover, the prototype has the capacity of getting information about geolocation as well as platform status (e.g. CPU load, temperature and energy consumption).

The main advantage of this proposal consists in the design of a solution based on open hardware architecture, open source, portability and low cost. These characteristics are useful for both monitoring structural health and the microseismic analysis

along specific zones. Regarding the prototype evaluation, results show an appropriate operation.

The paper is organized as follows: Section 2 presents related works. The design and implementation of the prototype, as well as the monitoring architecture, are detailed in Section 3. Section 4 describes the experimental evaluation and results. Finally, Section 5 presents conclusions and future lines of work.

2 Related Works

Monitoring systems focused on smart cities involve recent technological developments such as Internet of Thing [13] and communication architectures based on Wireless Sensor Networks (WSNs) [14]. In this context, risk management in order to mitigate disaster caused by seismic activity is one of the main tasks toward achieving sustainable urban development. The following are some of the most relevant and representative studies in the literature.

In [15], an early warning architecture is presented. This architecture takes advantage from sensors available in user devices (e.g. accelerometers in smartphones) in order to obtain acceleration data as well as to deploy a monitoring system. In [16], the authors analyze the importance regarding early warning systems implemented in Mexico after the devastating earthquake of 1985. On the other hand, these monitoring systems can be used to prevent disasters resulting from earthquakes, such as landslides or tsunamis. For example, [17] presents a set of projects in order to evaluate tsunami risks along the Mediterranean coast.

Regarding transducer devices, the accelerometers based on MEMS technology show high reliability and reduced size. MEMS technology comes from research on the design and manufacture of devices for navigation systems and space exploration [18]. In this case, the basic structure of a seismometer (i.e. the mass-spring system) is built within the multi-layer structure of an integrated circuit using a special process called micromachining. Currently, MEMS sensors are used in several research areas such as seismology, biomedicine, chemical analysis, wireless communications and robotics [19], [20].

In seismology, due to low cost and versatility, MEMS accelerometers represent an adequate alternative for implementing monitoring networks and early warning systems. Furthermore, some proposals that use this kind of accelerometers for seismic monitoring are detailed in [21], [22], [23] and [24]. These systems can be used in applications of structural health control focused on heritage buildings or even in communications infrastructures, as described in [25] and [26], respectively.

Additionally, [27] describes a system for detecting landslides caused by rock falls, a proposal that would be useful in order to improve road safety. Finally, there are some studies focused on monitoring the impact of seismic events on infrastructures required to provide basic services such as gas and water distribution networks, [28], [29].

On the other hand, regarding data acquisition and processing, accelerometers can be configured using a development platform type SBC, for example, Raspberry Pi

[30], Arduino [31], Beagle Bone [32], among others. Moreover, the interaction between a set of monitoring stations can be achieved by means of a communication architecture called Wireless Sensor Networks (WSNs) [33]. These sorts of networks have the capacity to self-configuring without the need of a central station or a preexisting infrastructure. Therefore, WSNs can be useful for both rural and urban environments [34]. Next, in Section 3, we present the system implementation.

3 System Architecture

This section describes the implementation of the prototype station as well as the main characteristics enabled for the microseismic monitoring system.

3.1 Prototype Implementation

The microseismic station was implemented using a development platform with embedded Linux (Raspberry Pi 3) [30] and accelerometers based on MEMS technology, Figure 1 shows the functional diagram of the station.

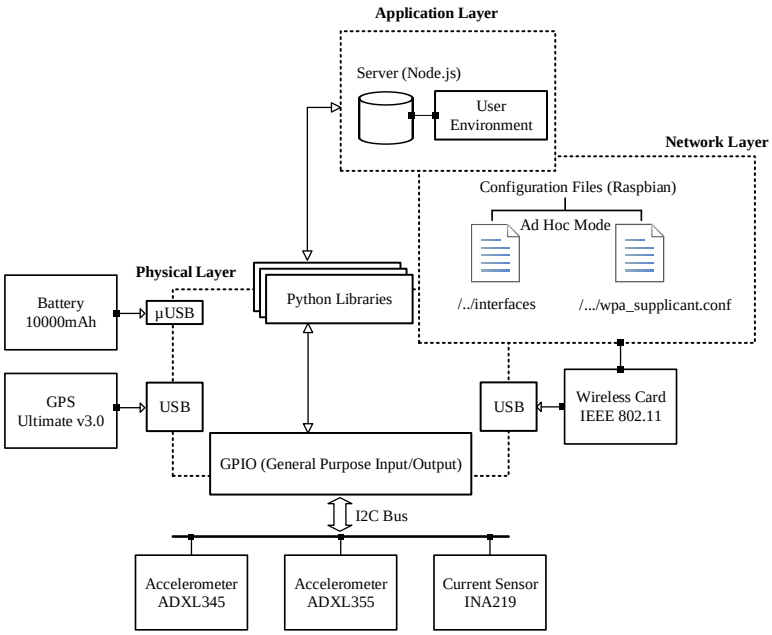


Fig. 1. Functional diagram of the microseismic station

As can be seen, the physical layer has five peripheral devices. In particular, the microseismic monitoring is performed by means of the Adxl345 [35] and Adxl355 accelerometers [36]. Table 1 describes the main technical characteristics for the accelerometers. The measurement range is specified in relation to the standard acceleration due to gravity (g, equivalent to 9.81m/s^2). Additionally, the current sensor INA219

[37] has been attached to the Raspberry Pi platform in order to assess the level of energy consumption demanded by the station. The sensors are handled by a set of open source Python libraries that are available at [38], [39], [40]. The connection to the platform is carried out via the I2C bus (Inter-Integrated Circuit) in the GPIO pins (General Purpose Input / Output). Moreover, with the intention of implementing a set of monitoring stations, a GPS sensor [41] was included in the prototype, particularly for synchronization tasks.

Table 1. Technical specifications for the accelerometers used in the prototype station

Parameter	Adxl345	Adxl355	Unit
Measurement range	±2, ±4, ±8, ±16	±2, ±4, ±8, ±16	g
Output resolution	10	20	bits
Sensitivity at ±2g	256	256000	LSB/g
Bandwidth	3200	1000	Hz
Current demanded	140	200	µA
Operating temperature	-40 a +85	-40 a +125	ºC

In regard to the network layer, we used an external wireless card (IEEE 802.11n), which was configured in ad hoc mode in order to allow the future integration of our station in a wireless sensor network. On the other hand, the wireless interface available on the platform board operates as a gateway for enabling Internet connection.

Moreover, the prototype is powered by a high current density lithium battery (10000 mAh) and for the remote management, we set up an HTTP server based on Node.js [42].

Finally, an electronic board was implemented in order to facilitate the interconnection between the sensors with the platform. Figure 2 shows the physical prototype implemented and the components.

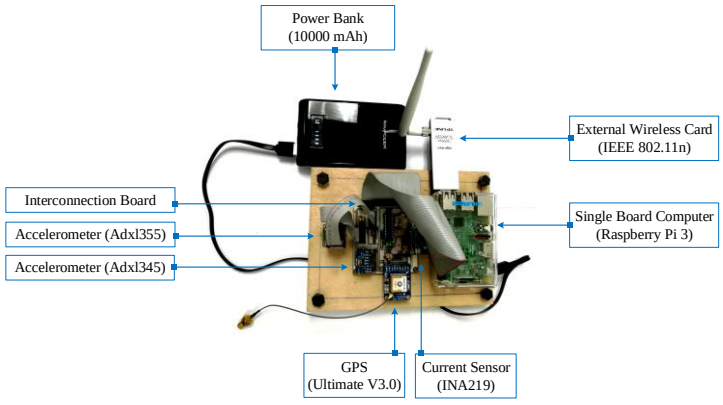


Fig. 2. Description of the microseismic station components

3.2 Microseismic Monitoring System

Figure 3 shows the functional diagram of the monitoring architecture. As can be seen, we developed a web application using Node.js, which allows the remote access to the station using a browser. Specifically, to monitor events as well as visualize the accelerometers information in real time, we have used WebSockets through the socket.io library [43].

In particular, a set of Python scripts were implemented in order to control the sensors operation. The data captured from the sensors are used to generate messages on the server side (*socket.emit* function). Then, the server sends to the remote client the information with the acceleration values detected (x, y and z). Additionally, the server sends messages about geolocation and energy consumption obtained from the GPS and from the current sensor, respectively. The send intervals for the messages can be configured or modified on the Python scripts. Similarly, to evaluate the system status, the server sends messages with information about temperature and CPU load, obtained in this case from the Raspberry Pi platform.

On the other hand, the web interface provides users with dynamic charts in order to detect instantaneous changes in the information from the sensors.

Finally, the sensor and system information is stored in the memory card of the station to keep a history of measures. The evaluation of the prototype station is detailed below.

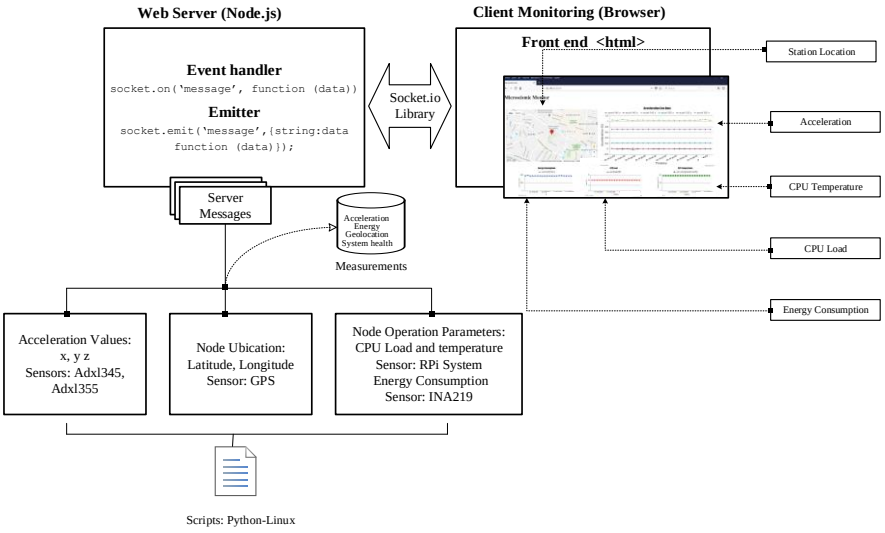


Fig. 3. Functional diagram: Architecture of the microseismic monitoring system

4 Experimental Evaluation and Results

This section presents a set of measurements that describes the station performance under operational conditions, i.e. during acquisition, processing and transmission of the data captured by the sensors.

4.1 Prototype Evaluation

In this experiment we carried out an evaluation about the load as well as the temperature measured on the CPU of the Raspberry Pi platform. To this end, we activated all processes that enable data acquisition from sensors (i.e. accelerometers, GPS and current sensor). The samples were captured at intervals of 1 second. Moreover, during the experiment, we also enable the web application for displaying information on the user interface. Figure 4 shows the results throughout one hour of operation.

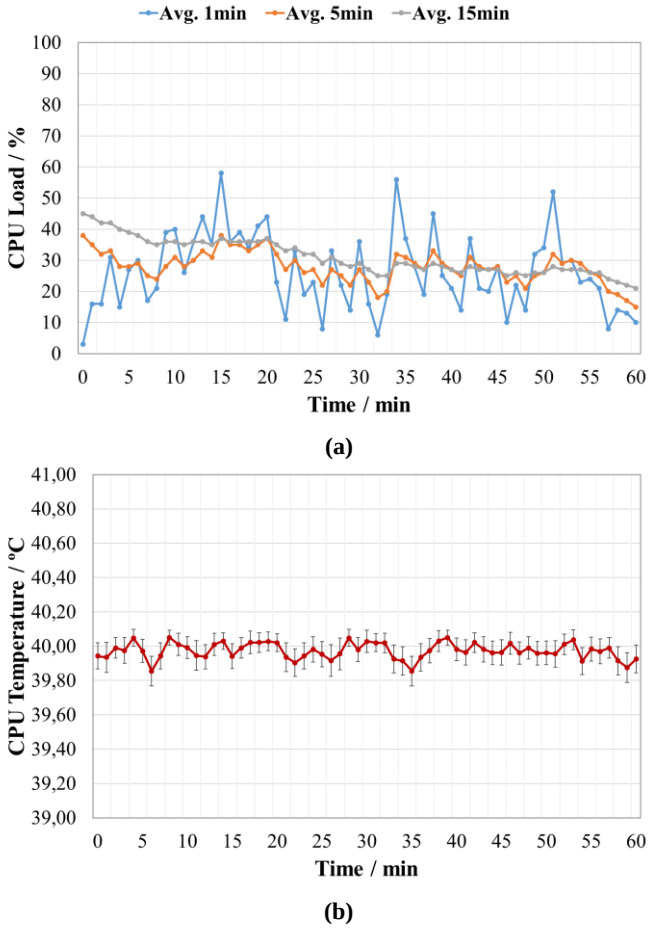


Fig. 4. Prototype evaluation: (a) CPU load monitoring. (b) CPU temperature monitoring

Figure 4 (a) describes the behavior of the CPU load. In particular, the samples were captured by means of the *uptime* command that provides information about the system load averages for the past 1, 5, and 15 minutes. As can be seen, results show that the processes demanded by the sensors along with the web application does not involve overload on the CPU. Specifically, the maximum load level detected was approximately 60%, while the average load for the analyzed interval is close to 30%.

On the other hand, Figure 4 (b) presents the temperature monitored on the CPU, the confidence interval showed were stated at the 95% confidence level, it can be seen, there are minimal changes on the CPU temperature. In particular, the average value is closed to 40ºC, that is distant from the maximum value recommended in the technical specifications (70ºC). Also, it is worth indicating that the average ambient temperature along the experiment was 20ºC.

4.2 Energy Consumption

In the previous experiment, we also captured current samples in order to determine the energy consumption demanded by the prototype. Similarly, the samples were captured at intervals of 1 second. Figure 5 shows the results throughout one hour of operation.

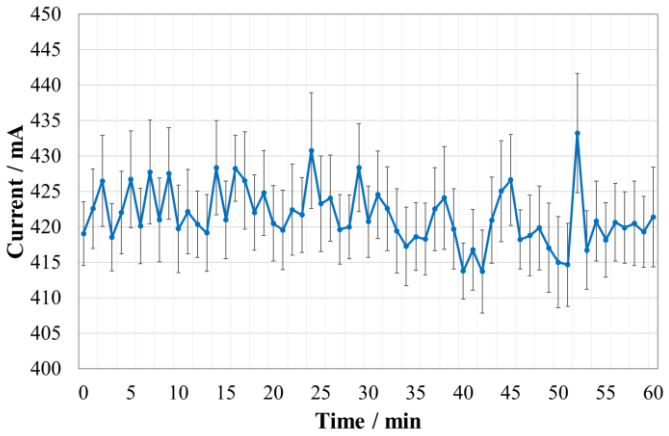


Fig. 5. Current samples captured during the prototype operation

In particular, it is worth noting the narrow confidence intervals (95% confidence level) meaning minimal variation among samples, specifically within a range of between 414mA and 433mA. In regard to the average current for the entire interval (computed from the samples), the value is 421mAh. Furthermore, we carried out additional experiments with the aim of analyzing the energy consumption by each device on the prototype. Figure 6 shows the results depending on the connected peripherals.

As can be seen, the energy demanded by the platform along with the accelerometers (i.e. without the GPS sensor), presents a consumption of approximately 385mAh.

On the other hand, when the prototype station uses one accelerometer (Adxl355 sensor), it reduces the energy expenditure to 379mAh. In regard to the platform and the external wireless card (i.e. without accelerometers), results show a consumption of 370mAh. Finally, it can be seen that the platform presents a base consumption of approximately 216mAh.

Accordingly, taking into account the battery capacity used to power the prototype (10000mAh), then the operation time ranges from 23 to 26 hours. The estimated autonomy is useful for setting up outdoor experiments.

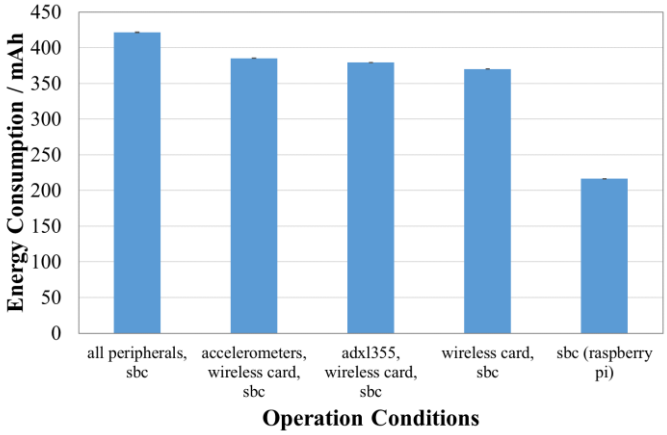


Fig. 6. Average energy demanded by the prototype under different operational conditions

4.3 Microseismic Monitoring

The characterization of the accelerometers, was carried out by means of multiple tests. Also, the prototype was enabled to operate in a continuous data acquisition mode. This methodology was defined to evaluate the sensitivity level for detecting seismic events.

Figure 7 shows the results obtained using the Adxl355 accelerometer throughout one hour of operation. Also, it is worth clarifying that for the results presented, we performed a baseline correction. This procedure consists in removing the direct component (DC value) from the acquired signal (i.e. the data offset with regard to the zero level of the acceleration).

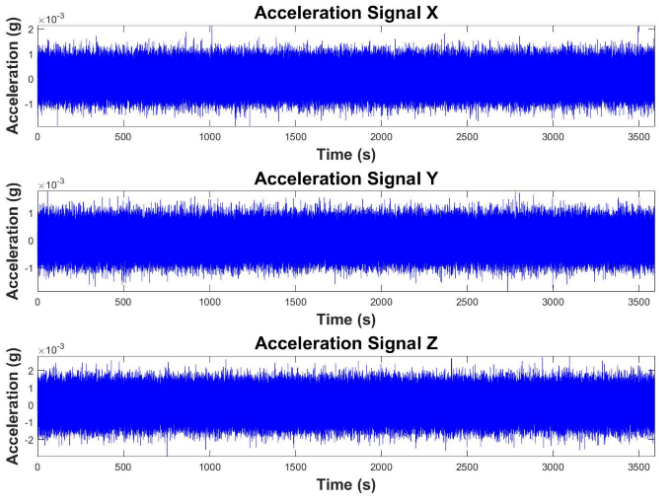


Fig. 7. Acceleration records (x, y, z) vs. time, obtained by the Adxl355 sensor

As shown, the graphics describe the acceleration values detected by the sensor on the x, y and z axes. It is important to point out that along the tests, there were no reported seismic events close to the facilities where the station was located (central campus, University of Cuenca). Consequently, the acceleration samples captured correspond to the background noise or urban seismic noise. Additionally, the signal behavior can be seen in more detail in Figure 8, which shows an interval corresponding to 1 minute of the acquired data. In particular, the maximum variations have been reported to range between approximately ±0.002g. This threshold represents the prototype sensitivity taking into account the location selected to carry out the experiments.

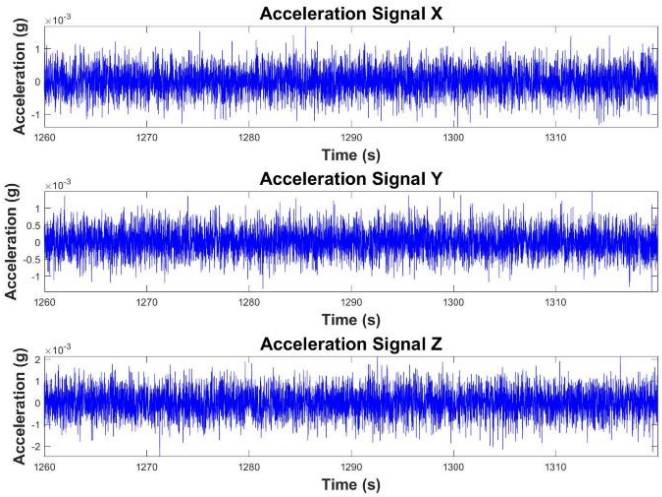


Fig. 8. Acceleration records corresponding to an interval of 1 minute

5 Conclusions

In this paper, we presented the design of a prototype station to evaluate microseismic events. Specifically, the prototype was designed and implemented using a single board computer as well as accelerometers based on MEMS technology, which significantly reduce the overall cost per station. Also, a web application was implemented in order to monitor the information captured by sensors in real time.

Regarding the prototype evaluation, experiments carried out show an appropriate operation. In particular, a maximum CPU load of 60% was detected due to simultaneous operation of peripherals. Also, the average value of temperature was approximately of 40ºC, which is distant from the threshold value recommended in the technical specifications (70ºC).

Moreover, a current sensor was included in order to characterize the energy expenditure as well as to estimate the autonomy of operation. Results indicate a lifetime between 23 to 26 hours, depending on the number of peripherals connected.

In regard to the experiments to evaluate the accelerometers sensitivity, the results show that our prototype allows to detect seismic events that cause accelerations higher than 0.002g. Although, this sensitivity is influenced by the site where the prototype is located, we consider that the value is suitable for applications of structural health.

Finally, as future work we plan to implement a set of stations with the aim to deploy a microseismic monitoring network.

Acknowledgements

The authors gratefully acknowledge the support of the Research Management Department of the University of Cuenca- Ecuador (DIUC) and the research group member of the Thematic Network Ciudades Inteligentes Totalmente Integrales, Eficientes y Sostenibles (CITIES-CYTED).

References

[1] B. Rashid and M. H. Rehmani, “Applications of wireless sensor networks for urban areas: A survey”, *J. Netw. Comput. Appl.*, vol. 60, pp. 192–219, 2016.

[2] K. F. Tiampo and R. Shcherbakov, “Seismicity-based earthquake forecasting techniques: Ten years of progress”, *Tectonophysics*, vol. 522–523, pp. 89–121, 2012.

[3] M. Wyss and Z. Wu, “How Many Lives were Saved by the Evacuation before the M 7.3 Haicheng Earthquake of 1975?”, *Seismol. Res. Lett.*, vol. 85, no. 1, pp. 126–129, 2014.

[4] E. Florido, F. Martínez-Álvarez, A. Morales-Esteban, J. Reyes, and J. L. Aznarte-Mellado, “Detecting precursory patterns to enhance earthquake prediction in Chile”, *Comput. Geosci.*, vol. 76, pp. 112–120, 2015.

[5] M. S. Lazaridou-Varotsos, *Earthquake prediction by seismic electric signals: The success of the VAN method over thirty years*. 2013.

[6] M. Akhoondzadeh, "Firefly Algorithm in detection of TEC seismo-ionospheric anomalies", *Adv. Sp. Res.*, vol. 56, no. 1, pp. 10–18, 2015.

[7] A. Bhardwaj *et al.*, "A review on remotely sensed land surface temperature anomaly as an earthquake precursor", *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.*, vol. 63, no. September 2016, pp. 158–166, 2017.

[8] L. Pierotti, F. Gherardi, G. Facca, L. Piccardi, and G. Moratti, "Detecting CO2 anomalies in a spring on Mt. Amiata volcano (Italy)", *Phys. Chem. Earth*, vol. 98, pp. 161–172, 2017.

[9] P. Bormann, "From earthquake prediction research to time-variable seismic hazard assessment applications", *Pure Appl. Geophys.*, vol. 168, no. 1–2, pp. 329–366, 2011.

[10] A. Carpinteri and O. Borla, "Fracto-emissions as seismic precursors", *Eng. Fract. Mech.*, vol. 177, pp. 239–250, 2017.

[11] A. Janusz, M. Grzegorowski, M. Michalak, Ł. Wróbel, M. Sikora, and D. Ślęzak, "Predicting seismic events in coal mines based on underground sensor measurements", *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 64, no. April, pp. 83–94, 2017.

[12] R. A. Grant and T. Halliday, "Predicting the unpredictable; evidence of pre-seismic anticipatory behaviour in the common toad", *J. Zool.*, vol. 281, no. 4, pp. 263–271, 2010.

[13] B. N. Silva, M. Khan, and K. Han, "Towards sustainable smart cities: A review of trends, architectures, components, and open challenges in smart cities", *Sustain. Cities Soc.*, vol. 38, no. January, pp. 697–713, 2018.

[14] A. Belghith and M. S. Obaidat, *Wireless Sensor Networks Applications to Smart Homes and Cities*. Elsevier Inc., 2016.

[15] A. M. Zambrano, I. Perez, C. Palau, and M. Esteve, "Technologies of Internet of Things applied to an Earthquake Early Warning System", *Futur. Gener. Comput. Syst.*, vol. 75, pp. 206–215, 2017.

[16] R. R. Castro *et al.*, "A review on advances in seismology in Mexico after 30 years from the 1985 earthquake", *J. South Am. Earth Sci.*, vol. 70, no. June 1911, pp. 49–54, 2016.

[17] Papadopoulos, *Tsunami Early Warning Systems and Risk Mitigation*. Elsevier Inc., 2016.

[18] NASA, "'Microdevice Laboratory,' MEMS Inertial Technology." [Online]. Available: https://microdevices.jpl.nasa.gov/capabilities/nano-and-micro-systems/mems-gyroscope.php. [Accessed: 27-Jun-2018].

[19] E. Y. Chow, S. P. Sanghani, and V. Ramesh, *Emerging research in wireless and MEMS for medical applications*. Elsevier Ltd., 2016.

[20] R. Osiander and A. G. Darrin, *Wireless MEMS for space applications*. Elsevier Ltd., 2016.

[21] D. Chen *et al.*, "A micro electrochemical seismic sensor based on MEMS technologies", *Sensors Actuators, A Phys.*, vol. 202, pp. 85–89, 2013.

[22] Z. Shen, C. Y. Tan, K. Yao, L. Zhang, and Y. F. Chen, "A miniaturized wireless accelerometer with micromachined piezoelectric sensing element", *Sensors Actuators, A Phys.*, vol. 241, pp. 113–119, 2016.

[23] G. Li *et al.*, "A MEMS based seismic sensor using the electrochemical approach", *Procedia Eng.*, vol. 47, pp. 362–365, 2012.

[24] S.Sindhuja and J. Siluvai, “MEMS-based wireless sensors network system for post-seismic tremor harm evaluation and building monitoring”, pp. 1–4, 2015.

[25] E. Lenticchia, R. Ceravolo, and C. Chiorino, “Damage scenario-driven strategies for the seismic monitoring of XX century spatial structures with application to Pier Luigi Nervi’s Turin Exhibition Centre”, *Eng. Struct.*, vol. 137, pp. 256–267, 2017.

[26] A. Ismail, “Seismic assessment of guyed towers: A case study combining field measurements and pushover analysis”, *HBRC J.*, vol. 12, no. 1, pp. 1–7, 2014.

[27] V. L. Zimmer and N. Sitar, “Detection and location of rock falls using seismic and infrasound sensors”, *Eng. Geol.*, vol. 193, pp. 49–60, 2015.

[28] C. Wang, W. Liu, and J. Li, “Artificial earthquake test of buried water distribution network”, *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, vol. 79, pp. 171–185, 2015.

[29] H. Miao, W. Liu, C. Wang, and J. Li, “Artificial earthquake test of gas supply networks”, *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, vol. 90, no. February, pp. 510–520, 2016.

[30] A. Lady, “Introducing the Raspberry Pi 2 - Model B”, 2015.

[31] M. Banzi, *Getting Starting with Arduino*, Second Edi. 2011.

[32] D. Molloy, *Exploring BeagleBone:Tools and Techniques for Building with Embedded Linux*. 2015.

[33] M. C. and S. Giordano, “Mobile ad hoc networking: milestones, challenges, and new research directions”, *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, no. 1, pp. 85–96, 2014.

[34] Aqeel-Ur-Rehman, A. Z. Abbasi, N. Islam, and Z. A. Shaikh, “A review of wireless sensors and networks’ applications in agriculture”, *Comput. Stand. Interfaces*, vol. 36, no. 2, pp. 263–270, 2014.

[35] A. Devices, “Data Sheet ADXL345”. [Online]. Available: www.analog.com/media/en/technical.../data.../ADXL345.pdf. [Accessed: 01-May-2018].

[36] Analog Devices, “Low Noise, Low Drift, Low Power, 3-Axis MEMS Accelerometers ADXL354/ADXL355”, 2016.

[37] A. Lady, “Adafruit INA219 Current Sensor”, pp. 1–19, 2017.

[38] GitHub, “Python library for the ADXL345”, [Online]. Available: https://github.com/pimoroni/adxl345-python. [Accessed: 27-Jun-2018].

[39] GitHub, “Python 3 library to connect ADXL355 PMDZ accelerometer on Raspberry Pi”. [Online]. Available: https://github.com/gpvidal/adxl355-python.

[40] GitHub, “Python library INA219 current sensor”. [Online]. Available: https://github.com/scottjw/subfact_pi_ina219. [Accessed: 27-Jul-2018].

[41] A. Lady, “Adafruit Ultimate GPS”, 2017.

[42] G. Ornbo, *Programación Node.js*. Anaya Multimedia, 2013.

[43] GitHub, “Realtime application framework (Node.JS server)”. [Online]. Available: https://github.com/socketio/socket.io. [Accessed: 27-Jun-2018].

Planificación de transporte urbano en ciudades inteligentes

Sergio Nesmachnow[1] [0000-0002-8146-4012], Renzo Massobrio[1,2] [0000-0002-0040-3681]
Alfredo Cristóbal[3] [0000-0003-2297-6031], Andrei Tchernykh[4] [0000-0001-5029-5212]

[1] Universidad de la República, Uruguay
[2] Universidad de Cádiz, Spain
[3] Universidad Veracruzana, México
[4] Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, México

sergion@fing.edu.uy, renzom@fing.edu.uy,
acristobal@uv.mx, chernykh@cicese.mx

Resumen. Este artículo presenta las principales actividades propuestas por el proyecto 'Planificación de transporte urbano en ciudades inteligentes' desarrollado por grupos de investigación de Uruguay y México, en el marco del programa 'Fondo Conjunto de Cooperación Uruguay–México'. Se describen los principales conceptos de la propuesta y su contexto, y se presentan las actividades en desarrollo y resultados preliminares.

Palabras clave: Ciudades inteligentes, transporte urbano, análisis de datos urbanos.

1. Introducción

La complejidad de las actividades desarrolladas en las ciudades impone desafíos para la movilidad de sus habitantes. En ese contexto, los sistemas de transporte urbano tienen un rol central en las grandes urbes, para el desplazamiento diario de gran parte de la población [7]. En las últimas décadas se ha cambiado la denominación de este fenómeno, pasando del concepto de tránsito al de *movilidad*, presentando una visión sobre la problemática centrada en los usuarios, con interés por el ambiente y que permita comprender la dinámica de los traslados en las ciudades modernas [20].

Actualmente, los principales problemas de la movilidad urbana se relacionan con la incapacidad de los sistemas de transporte público de satisfacer las necesidades de un número creciente de usuarios. Para poder desarrollar soluciones innovadoras es necesario contar con información actualizada y de calidad acerca de la movilidad de los ciudadanos [3]. En general, en las ciudades de Latinoamérica la información disponible en los repositorios de datos del sector público es escasa y de baja calidad. Los mecanismos de recolección y almacenamiento de datos no están sistematizados y están limitados por la escasa disponibilidad de recursos humanos y presupuestales.

Ante el panorama descrito, la incorporación de tecnología en el proceso de diseño y planificación de sistemas de transporte urbano resulta indispensable para ofrecer un servicio de calidad a los ciudadanos. El proyecto 'Planificación de transporte urbano en ciudades inteligentes' parte de esta coyuntura y plantea el estudio y desarrollo de metodologías de análisis y diseño para el apoyo a la toma de decisiones relativas a la movilidad y el transporte urbano en ciudades inteligentes.

Las ciudades inteligentes (smart cities) proponen incorporar las tecnologías de la información y la comunicación con el objetivo de mejorar la calidad y eficiencia de los servicios urbanos [4]. Las ciudades inteligentes permiten un uso responsable de los recursos y fomentar la participación activa de los ciudadanos en los procesos de toma de decisiones, con el fin de alcanzar una ciudad sustentable e inclusiva. Los sistemas de transporte inteligente (Intelligent Transportation Systems, ITS) son un componente fundamental en las ciudades inteligentes. Los ITS permiten recolectar una gran cantidad de datos de la movilidad en las ciudades, que pueden ser procesados con el fin de extraer valiosa información acerca de la movilidad de los ciudadanos [6]. Esta información puede ser ofrecida tanto a los usuarios del sistema de transporte como a los planificadores y tomadores de decisiones.

El proyecto propone la resolución de problemas de movilidad y transporte público en el contexto de ciudades inteligentes. Esta temática es interesante desde lo académico, debido a la complejidad de los problemas abordados y a la masividad de los datos a analizar, así como desde lo social, al generar un gran impacto en la experiencia de los ciudadanos en sus desplazamientos, afectando además en aspectos económicos y medioambientales de las ciudades. Las realidades actuales de los sistemas de transporte de los países proponentes (Uruguay, México y Cuba) son variadas. Sin embargo, existe un punto en común: las iniciativas de incorporación de tecnología al proceso de planificación del transporte son recientes o en algunos casos nulas. Por este motivo creemos firmemente que este proyecto puede contribuir en acercar el concepto de transporte inteligente a la realidad de nuestras ciudades.

El artículo se organiza del modo que se describe a continuación. La sección 2 introduce trabajos previos desarrollados en Uruguay y México por los grupos de investigación participantes. El proyecto se describe en la sección 3 y sus principales actividades y resultados parciales obtenidos se detallan en la sección 4. Finalmente, la sección 5 presenta conclusiones y las principales líneas de trabajo actual y futuro.

2. Trabajos previos en Uruguay y México

Esta sección describe trabajos previos desarrollados en la temática del proyecto por los grupos de investigación participantes en la propuesta, en Uruguay y México.

2.1 Uruguay

Los antecedentes de proyectos e investigaciones realizadas en Uruguay por parte del grupo de trabajo de la Universidad de la República incluyen el análisis de grandes volúmenes de datos y resolución de problemas de optimización del transporte público:

- Sincronización inteligente de semáforos utilizando algoritmos evolutivos, para optimizar el flujo vehicular y reducir la polución urbana. Como caso de estudio se optimizaron los ciclos semafóricos para un corredor de transporte público en la ciudad de Montevideo [14,19].
- Procesamiento en la nube de grandes volúmenes de datos de GPS del transporte público en Montevideo. Se procesó información histórica de geolocalización de los autobuses en la ciudad de Montevideo con el fin de obtener estadísticas sobre la eficiencia del transporte público [11].

- Planificación de viajes compartidos en taxis. El proyecto propuso la utilización de inteligencia computacional para planificar los viajes en taxis de un grupo de usuarios con el fin de reducir los costos y minimizar las demoras [10].

2.2 México

Los antecedentes de proyectos e investigaciones realizadas por parte de instituciones mexicanas vinculadas con el proyecto incluyen:

- Sistema de cobro automático de peaje en zonas de gran tráfico vehicular. El proyecto instrumentó una identificación única de los vehículos y capturar en tiempo real sus posiciones geográficas con el fin de cobrar peaje automáticamente a vehículos que se encuentran en una zona considerada como de alto tráfico vehicular (http://www.capufe-iave.com.mx).
- Sistema de monitoreo automático de velocidad de automóviles en tiempo real, donde cada vehículo actúa como un nodo del observatorio ciudadano que permite conocer la velocidad de los vehículos en las calles de la ciudad en tiempo real.
- Sistema para el análisis multidimensional de datos de tráfico utilizando técnicas de minería de datos y de inteligencia de negocios.
- Sistema para asignación de flota de autobuses para cubrir la demanda de pasajeros y reducir la circulación de vehículos semivacíos, haciendo más rentable la operación y favoreciendo la descongestión de las vías [15].
- Sistema para el diseño de horarios y la calendarización de los vehículos para la planificación de transporte público, basado en el estudio y optimización de la frecuencia de los vehículos para evitar sobrecostos, mejorar la calidad del servicio percibida por el usuario, y reducir la contaminación ambiental [15,16].
- Planificación multiobjetivo para la creación de horarios utilizando vehículos con diferente capacidad y costo de funcionamiento, considerando las restricciones de las entidades gubernamentales para los ITS [17,18].

3. Descripción del proyecto

Esta sección presenta una descripción general del proyecto ‘Planificación de transporte urbano en ciudades inteligentes’.

3.1 Beneficiarios del proyecto

Los beneficiarios directos del proyecto son las instituciones participantes, que potenciarán sus actividades de formación, investigación y desarrollo en la temática de ciudades inteligentes. Asimismo, el proyecto será de utilidad para las autoridades locales de las ciudades involucradas, que apoyan la iniciativa: Intendencia de Montevideo (Uruguay), Ayuntamiento de Poza Rica (Veracruz, México) e Instituto Municipal de Investigación y Planeación de Ensenada (México).

El proyecto cuenta con un fuerte componente social, con impacto directo en aspectos fundamentales de toda ciudad moderna: el transporte y la movilidad de los ciudadanos. Se propone incorporar tecnologías para mejorar los sistemas de transporte actuales, para que ofrezcan una mejor experiencia de viaje. Los principales beneficios que podrán ser observados por los ciudadanos incluyen: la disminución en los tiempos de viajes gracias a la mejor planificación del tráfico, una mejora en los costos debido a la planificación eficaz del sistema de transporte, la posibilidad de adoptar nuevos modos de transporte más ecológicos y económicos contando con infraestructura específica que brinde seguridad y comodidad, entre otros.

El proyecto ofrece beneficios a las empresas de transporte que brindan servicios en las ciudades. Actualmente, la planificación de rutas se realiza de forma manual, con poca información sobre las demandas reales entre puntos de la ciudad. De igual forma, en ocasiones la planificación de los horarios y frecuencias de los servicios de autobuses no se corresponde con las necesidades de los pasajeros, lo que conduce a líneas poco rentables en ciertos horarios o a demandas no cubiertas por parte de las empresas. La incorporación de tecnología en la toma de decisiones sobre líneas y frecuencias de autobuses tiene un impacto directo en la mejora de rentabilidad de las empresas de transporte público de la ciudad.

Los beneficios también se extienden a las autoridades de cada ciudad, que cumplen roles de regulador, establecen las políticas públicas de transporte, controlan y fiscalizan el sistema de transporte. Actualmente, las autoridades cuentan con diversas fuentes de datos provenientes de sensores presentes en los ITS (e.g., registros de venta de boletos, GPS instalados en los vehículos, horarios programados, datos de teléfonos móviles). Sin embargo, estos datos no suelen ser utilizados para extraer información útil que permita mejorar el sistema de transporte y ofrecer un mejor servicio a los ciudadanos. Indirectamente, la planificación del tráfico contribuye a mejorar las condiciones medioambientales. Este es un tema transversal que tiene un impacto directo en la salud y en la calidad de vida de los ciudadanos.

Finalmente, el proyecto propone apoyar a la comunidad de la ciudad de Camagüey, Cuba, para el desarrollo de estrategias de planificación de movilidad y la aplicación de las metodologías y técnicas a desarrollar en la investigación. La comunidad de la ciudad de Camagüey, Cuba es otro beneficiario directo del proyecto.

3.2 Contexto y vínculos con las políticas públicas nacionales, y sectoriales

El proyecto plantea abordar temas pertinentes en el marco de la gestión de servicios públicos en las ciudades involucradas en la propuesta.

La Intendencia de Montevideo (IM) propuso en 2010 el Plan de Movilidad Urbana para reestructurar y modernizar el transporte urbano en la ciudad. En el marco del Plan de Movilidad Urbana se creó el Sistema de Transporte Metropolitano (STM), con el objetivo de integrar el transporte público de Montevideo en un único sistema. Uno de los primeros cambios introducidos por el STM consistió en equipar a los autobuses con unidades GPS e incorporar una tarjeta inteligente para el pago de los viajes. Estos dispositivos permiten recolectar un enorme volumen de datos sobre la ubicación de las unidades, las ventas de boletos, los trasbordos entre distintas líneas, entre otros. Actualmente, la IM recolecta datos enviados por las empresas de transporte pertenecientes al STM. Sin embargo, los datos recolectados no son utilizados con el fin de extraer información respecto a la movilidad de los pasajeros.

Complementariamente, la ciudad de Montevideo participa desde mayo de 2016 en el desafío “100 ciudades resilientes” impulsado por la fundación Rockefeller. El programa busca capacitar a las autoridades de las ciudades para “diseñar, implementar y administrar soluciones proactivas frente a los desafíos planteados por la urbanización, la globalización y el cambio climático”. Entre varios de los desafíos señalados por la organización se destaca el de un “pobre sistema de transporte”. El objetivo de este desafío es el de lograr un libre movimiento de personas y bienes, a través de un sistema de transporte multimodal.

En México, existe un plan para optimizar el tráfico vehicular en autopistas federales, para el cual los tres niveles de gobierno mexicanos (municipal, estatal y federal) han invertido en tecnología para monitoreo y optimización del parque vehicular de la zona conurbada Poza Rica-Tihuatlán-Papantla-Coatzintla.

Concretamente, la ciudad de Poza Rica, Veracruz, cuenta con proyectos viales para fomentar la sustentabilidad en el transporte público mediante la modernización del parque vehicular, la capacitación vial y el ordenamiento del tránsito para mejorar la movilidad urbana. Estos proyectos se encuentran descritos en el Plan Municipal de Desarrollo Poza Rica 2014-2017. Entre las obras más significativas de este plan se encuentran el cambio de sentido de calles del centro de la ciudad, la construcción de un distribuidor vial, la rehabilitación de rutas alternas para descongestionar el tráfico y la incorporación de rutas largas de transporte público para intercomunicación entre municipios que conforman la zona conurbada.

En Ensenada, como fuente de información se cuenta con la colaboración del Instituto Municipal de Investigación y Planeación de Ensenada, cuyas autoridades manifestaron interés por el proyecto y se acordó trabajar en conjunto, tomando como base un estudio de tránsito y movilidad realizado en 2016.

3.3 Aportes complementarios sobre temas transversales

La movilidad urbana es un medio que permite realizar actividades esenciales de los ciudadanos y, por lo tanto, impacta tanto desde el punto de vista humano como urbanístico en la vida de las ciudades. El continuo crecimiento del parque automotor en las ciudades impacta negativamente en las emisiones producidas y en la salud de los habitantes. Permitir un flujo de vehículos apropiado en las vías de tráfico de una ciudad asegura una menor contaminación ambiental y sonora.

En este sentido, el proyecto tiene aportes complementarios sobre factores transversales definidos como prioritarios para las ciudades de las instituciones proponentes, con aplicación directa a otras ciudades latinoamericanas. La planificación inteligente del tráfico es de gran importancia en el caso de grandes urbanizaciones y es abordada en el proyecto en los siguientes aspectos: i) la planificación del tráfico vehicular y su relación con la polución y la emisión de contaminantes por parte de los vehículos y ii) el diseño y planificación de vías alternativas para la movilidad de ciudadanos (el caso concreto de las ciclovías). Ambos temas tienen un alto impacto en el desarrollo de sistemas de transporte sustentable y de movilidad sostenible. Las experiencias previas relacionadas con la planificación de tráfico y su impacto en la contaminación ambiental en la ciudad de Montevideo están limitadas a esfuerzos puntuales de la Intendencia junto a la Dirección Nacional de Medio Ambiente. No se conocen antecedentes nacionales que planteen el desarrollo de herramientas para la planificación del tráfico.

Un aspecto importante de la filosofía de diseño de los sistemas a construir en el proyecto es la inclusión y participación de sus beneficiarios finales, los ciudadanos. En este sentido, la integración de los valores, intereses y necesidades de los beneficiarios es clave no solo para el correcto funcionamiento de los sistemas, sino también como forma de enriquecer la experiencia humana [13]. Por este motivo, el proyecto propone involucrar a representantes de la sociedad civil en los diagnósticos y especificación de problemas a tratar, en el refinamiento de los objetivos, la recolección de los datos y su muestreo (a través del uso y difusión de la aplicación de recolección de datos) y la evaluación de las soluciones implementadas. Se propone que estas formas de participación sean coordinadas por las contrapartes locales.

3.4 Proyecciones y sostenibilidad

La proyección y sostenibilidad de la iniciativa una vez concluido el aporte del Fondo Conjunto de Cooperación México-Uruguay está garantizada por las actividades de investigación en la temática que desarrollan los grupos de trabajo. Otro factor relevante para asegurar la sostenibilidad es el interés y el apoyo de las autoridades de las ciudades de las instituciones que participan en la propuesta. Existe un apoyo manifiesto de las universidades y de los gobiernos involucrados en colaborar con las actividades del proyecto y posibilitar su aplicación directa en la práctica. Se propone aplicar las metodologías y técnicas a desarrollar en el proyecto en la ciudad de Camagüey, Cuba. Esta colaboración se plantea como un primer paso para replicar las metodologías, actividades y resultados del proyecto en otras ciudades de Latinoamérica. Dado que el proyecto contempla diversos medios de transporte, se analizará la adaptación de las mejores estrategias considerando las características de la ciudad objetivo. Un aspecto importante es contemplar la realidad del centro histórico de Camagüey, declarado patrimonio de la humanidad por la UNESCO en 2007, que constituye, un ejemplo de asentamiento urbano tradicional con influencia de la arquitectura y el urbanismo de la Europa medieval en el trazado urbano, donde las vías alternativas de transporte (urbano, ciclovías) tienen un importante impacto en la preservación de la zona. La Universidad de Camagüey y el Gobierno Municipal de la ciudad de Camagüey apoyan el proyecto y tienen interés por aplicar las soluciones desarrolladas a la realidad de la ciudad de Camagüey.

3.5 Problemas a abordar en el marco del proyecto

El proyecto propone la aplicación de inteligencia computacional a la planificación de movilidad en el contexto de ciudades inteligentes, en especial problemas de relevancia en las ciudades de Montevideo, Ensenada y Poza Rica. Las soluciones a los problemas abordados considerarán los intereses de todos los actores involucrados: i) los intereses de los ciudadanos, usuarios de los sistemas de transporte, que buscan un transporte confortable, eficiente, económico, confiable y amigable con el medio ambiente; ii) los intereses de las autoridades, que buscan controlar el correcto funcionamiento del sistema, aplicar las políticas de movilidad que estiman necesarias y asegurar que los ciudadanos tengan un servicio adecuado; iii) las empresas de transporte, que persiguen intereses principalmente económicos y que están reguladas por las políticas establecidas por las autoridades. Los detalles de los problemas abordados se describen a continuación.

Análisis de demanda de movilidad. Para poder resolver problemas de optimización de transporte urbano es indispensable conocer los patrones de movilidad de las personas. La movilidad en las ciudades se suele representar mediante matrices origen-destino, que indican la cantidad de personas desplazándose entre cada par de puntos. En los enfoques clásicos del problema, estas matrices se generan mediante encuestas realizadas a los pasajeros. Sin embargo, las encuestas ofrecen solamente una visión parcial de la movilidad de los ciudadanos e implican un gasto considerable cada vez que se desean obtener datos actualizados. El proyecto propone una alternativa para estudiar la movilidad urbana tomando ventaja de datos generados por los ITS.

Adicionalmente, se propone el desarrollo de un mecanismo complementario para la recolección de datos basado en una aplicación móvil. Los datos de movilidad recolectados por la aplicación serán procesados junto a los datos generados por los ITS de la ciudad en un sistema centralizado de almacenamiento y análisis (también a desarrollar en el proyecto). El procesamiento se llevará a cabo utilizando técnicas de inteligencia computacional y computación distribuida, para obtener elementos que facilitarán la planificación u optimización de los sistemas existentes. El resultado de analizar estos datos contribuirá a la comprensión de los modelos de comportamiento y patrones espacio-temporales de las personas, incluyendo la detección de comunidades espacio-temporales de viajeros, la variación de patrones de viajes entre horas y días de la semana y las preferencias de las rutas seleccionadas. La aplicación móvil se desarrolla siguiendo una metodología que contempla el involucramiento de los usuarios finales, ciclos de trabajo cortos y la evaluación continua. El objetivo de la utilización de estas técnicas de desarrollo ágil es la obtención de un resultado final satisfactorio en cuanto a funcionalidades deseadas y facilidad de uso, que fomente un grado de adopción adecuado y que garantice la recolección de un volumen de datos significativo, que no comprometa el resultado de los análisis a realizar.

Planificación de recorridos y frecuencias del transporte público. Los datos recogidos por los ITS permiten extraer valiosa información acerca de la movilidad de los pasajeros, el nivel de utilización de los autobuses, la velocidad y los tiempos de viaje, la puntualidad de los servicios respecto a los horarios programados, entre otros. Esta información es necesaria para la resolución de diversos problemas de optimización del transporte público: el diseño y rediseño de líneas de autobuses, la ubicación óptima de paradas dentro de las rutas, la planificación de horarios para satisfacer la demanda, la generación de agendas para los choferes, entre muchos otros [8,9]. El proyecto propone estudiar el diseño de nuevas líneas y la reforma de líneas existentes en las ciudades de Montevideo, Ensenada y Poza Rica, enfocándose en el estudio de soluciones que permitan, mediante mínimas inversiones por parte de las autoridades, atender demandas específicas que actualmente no son cubiertas de forma adecuada. A modo de ejemplo, se propone la incorporación de líneas de autobuses que permitan interconectar centros de estudio, la modificación de líneas existentes para cubrir la demanda en centros logísticos en la periferia de la ciudad, entre otros.

Planificación de redes alternativas de desplazamiento: peatones y ciclovías. Los medios de transporte motorizados históricamente han representado una solución para la movilidad en las ciudades. Sin embargo, estos modos de transporte tienen efectos negativos como la congestión (que aumenta los tiempos de viaje) y la polución (que degrada el bienestar de todos los habitantes de la ciudad). Como respuesta a esta

situación, tanto por voluntad de los ciudadanos (usuarios) como de las entidades que gestionan las ciudades (planificadores), se ha experimentado un incremento sustancial del uso de la bicicleta para viajes habituales, lo que además ha ayudado a mejorar la equidad y el acceso a oportunidades socioeconómicas de los ciudadanos [22]. La infraestructura específica para la circulación de bicicletas generalmente consiste en una especialización del espacio urbano, ya sea mediante señalizaciones, segregaciones o pavimentos específicos, con diferentes costos de construcción y de mantenimiento [21]. La elección de una determinada infraestructura tiene impacto en la percepción de los usuarios del sistema. Se propone abordar el problema de decidir dónde construir infraestructura y de qué tipo, sujeto a restricciones presupuestales y de diseño urbano, y contemplando los intereses de los usuarios.

Otro aspecto relevante para el diseño de sistemas de transporte sustentables consiste en la construcción de infraestructura específica para el desplazamiento eficiente, confortable y seguro de peatones. Las necesidades de los peatones suelen ser erróneamente relegadas a un segundo plano al momento de planificar los sistemas de transporte de las ciudades. Sin embargo, un adecuado diseño de la infraestructura puede contribuir a una vida más saludable de los ciudadanos, permitiendo el disfrute de los espacios comunes de forma segura y amigable con el entorno.

Planificación de semáforos. La congestión vehicular constituye uno de los problemas más significativos de las urbanizaciones modernas. El exceso de vehículos en la red de vías de tráfico hace que la velocidad de los vehículos se reduzca, llegando en el peor caso a detener completamente el tráfico. De este contexto surge la necesidad de optimizar los sistemas de control vehicular en las ciudades modernas, para mejorar el flujo del tráfico en horas pico con alta densidad de vehículos por área. Mejorar el flujo de tráfico mediante modificaciones en la infraestructura es una solución costosa e intrusiva para los ciudadanos. Como consecuencia, los enfoques utilizando métodos indirectos de control surgen como alternativas significativamente más económicas y promisorias sin impacto negativo en los usuarios. Uno de los métodos indirectos más útiles para la optimización del tráfico lo constituye la programación de los ciclos de las luces de los semáforos, que permite mejorar la fluidez del tráfico y el control de transporte público y vehículos privados [23].

Los enfoques que aplican inteligencia computacional se han aplicado para proporcionar alternativas viables para resolver los complejos problemas de optimización relacionados con la planificación de semáforos [1]. El proyecto propone la aplicación de métodos de inteligencia computacional combinados con estrategias de simulación microscópica de tráfico, sobre escenarios reales construidos con datos obtenidos de las ciudades de Montevideo, Ensenada y Poza Rica.

4. Principales actividades y su desarrollo actual

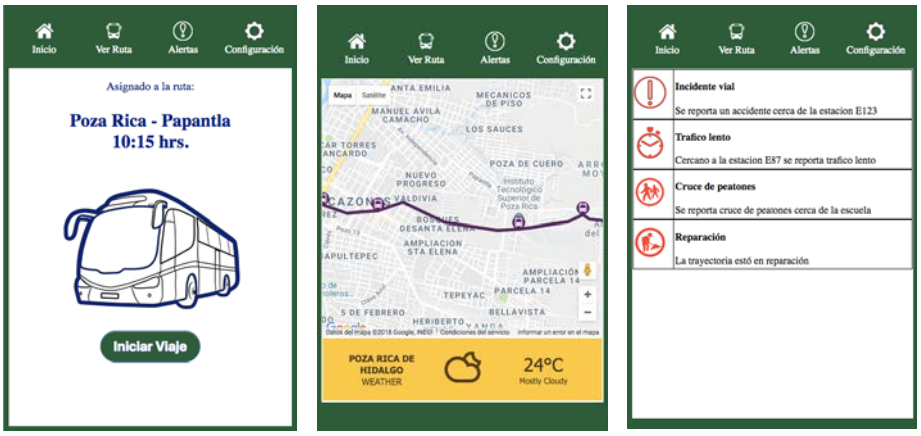
El proyecto propone actividades orientadas al análisis de problemas relevantes y el desarrollo de soluciones para los problemas identificados. Complementariamente, se propone la formación de estudiantes de grado y posgrado en la temática del proyecto, la realización de reuniones científicas y de eventos de difusión para posibilitar la transferencia tecnológica de los conocimientos y soluciones desarrolladas. Los principales detalles de las actividades propuestas se describen a continuación.

4.1 Diseño, implementación y distribución de una aplicación móvil para la recolección de datos de movilidad

Se propuso desarrollar una aplicación multiplataforma, de código abierto, que se beneficie de la utilización de frameworks para minimizar la duplicación de esfuerzos que conlleva el uso de las herramientas de desarrollo nativas de cada plataforma. El sistema de almacenamiento centralizado y los servicios remotos que la aplicación móvil consume se construyen sobre una infraestructura cloud que permite la adaptación dinámica a las cargas de trabajo, que pueden variar significativamente y son difíciles de estimar con antelación. Un enfoque similar se utiliza para desarrollar la componente analítica del sistema, utilizando plataformas de análisis de grandes volúmenes de datos y sistemas de información geográfica para el análisis periódico de la información recabada. Respecto a la distribución de la aplicación móvil, el objetivo inicial es alcanzar un mínimo de mil viajes reportados por día, para los cuales se propone recolectar los datos de duración y muestreo de la ubicación de los usuarios a intervalos regulares de entre 20 y 30 segundos. Se planea llegar al número de mil viajes diarios en un periodo de seis meses a partir de la liberación de la primera versión funcional de la aplicación. El registro de nuevas fuentes de datos y la distribución de la aplicación se hará en forma incremental, comenzando con un grupo de control, expandiéndose luego a los miembros de las contrapartes en el gobierno y llegando finalmente al público general a través de la publicación en las tiendas oficiales de las plataformas móviles. El resultado de esta actividad es una aplicación móvil para la recolección de datos de movilidad en funcionamiento y distribuida en comunidades de las ciudades de las instituciones participantes en la propuesta.

Esta actividad se ha iniciado y los principales avances incluyen un sistema cliente-servidor donde el software cliente captura los datos del usuario y los envía al software servidor para su almacenamiento y su análisis. El software cliente está implementado como una aplicación móvil que tiene dos versiones: una versión para el rol usuario y otra versión para el rol conductor. La versión del conductor es una alternativa barata y funcional a usar un hardware de comunicación incrustado en la unidad de transporte. El uso de una aplicación móvil asume que los conductores tienen un dispositivo móvil o teléfono inteligente que pueden usar para su trabajo. La aplicación móvil permite la captura de la información relacionada con el conductor y también la información relacionada con la unidad de transporte. La aplicación permite iniciar y finalizar un recorrido en la ruta asignada al conductor, y como servicio adicional, la aplicación permite al conductor reportar incidencias (robo, choque, inundación por lluvia de la vía de tránsito, etc.) en el recorrido. Además, la aplicación avisa al conductor sobre alertas de incidencias registradas en la ruta que recorre. La Fig. 1 presenta capturas de pantalla de la aplicación móvil.

En su versión usuario, la aplicación móvil captura datos de la actividad del usuario del transporte público junto con su geoposición y las envía al servidor. Como servicio adicional, la aplicación muestra información sobre el sistema de transporte público de la ciudad y hace recomendaciones al usuario sobre diferentes rutas para llegar a su destino considerando diferentes criterios, por ejemplo: el menor tiempo de recorrido, el menor número de transbordos, el menor costo, el menor número de reporte de incidentes delictivos, y menor riesgo por inundación. La Fig. 2 presenta capturas de pantalla de la aplicación móvil disponible para el usuario final.

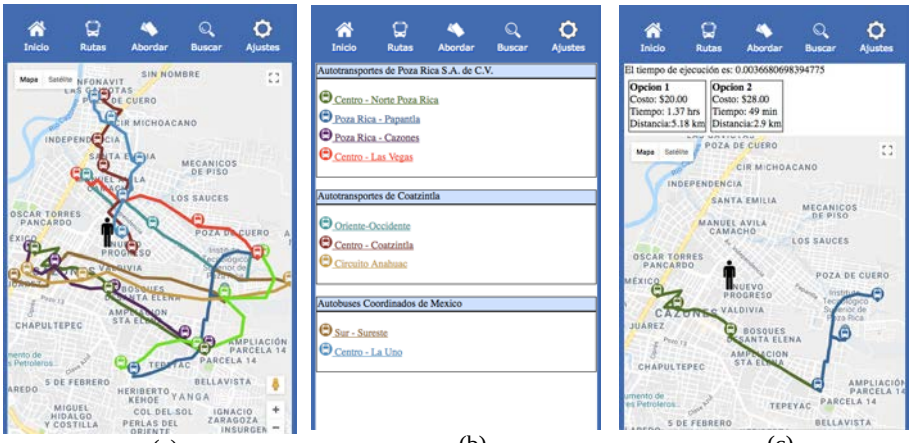


(a) (b) (c)

Fig. 1. Capturas de la aplicación móvil para el conductor de la unidad de transporte público: (a) inicio de un recorrido por una ruta asignada, (b) muestra de un recorrido de la ruta asignada, (c) muestra de la lista de incidentes en el recorrido.

Ambas versiones de la aplicación móvil envían datos al software servidor cada vez que el usuario envía una solicitud de información al servidor o cada 30 segundos en caso de que el usuario no tenga interacción con el software servidor.

La idea de brindar servicios a los actores involucrados en el sistema de transporte público intenta fomentar el uso de la aplicación. Las aplicaciones móviles además de proveer un servicio comunitario también toman datos de movilidad de los usuarios y de las unidades de transporte público a lo largo de la ciudad. Con los datos adquiridos, se pretende hacer un análisis de frecuencia de uso así como de capacidad de las unidades de transporte público, como se ha explicado anteriormente.



(a) (b) (c)

Fig. 2. Capturas de la aplicación móvil para el usuario del transporte público: (a) muestra de todas las rutas de transporte público de la ciudad (b) selección de una ruta específica, (c) planificación de un recorrido por la ciudad.

4.2 Relevamiento estado del arte sobre movilidad en ciudades inteligentes

Esta actividad propone el análisis de trabajos relacionados en las temáticas de planificación de tráfico y trasporte público, metodologías y técnicas para análisis de movilidad y construcción de matrices origen destino, y aplicación de inteligencia computacional para problemas de planificación de tráfico. La actividad involucra a los grupos de investigación de todas las instituciones proponentes. El resultado de esta actividad es un documento de análisis de movilidad e identificación de problemas comunes a los sistemas de transporte de Montevideo, Ensenada y Poza Rica.

Esta actividad se ha iniciado y los avances incluyen un relevamiento del estado del arte sobre problemas de planificación de transporte público, el estudio de metodologías para la estimación de matrices origen-destino y para sincronización de frecuencia de autobuses. Parte del relevamiento realizado se ha incluido en el artículo publicado sobre relocalización de paradas de trasporte público [5].

4.3 Actividades de formación

El proyecto prevé actividades de formación, incluyendo la asistencia a un curso corto en la temática de sistemas de transporte inteligentes por parte de tres estudiantes de posgrado (un estudiante de cada universidad participante). Las temáticas del curso se relacionarán con la estimación y modelado de demanda en sistemas de transporte inteligentes, el manejo de datos de tráfico y la planificación del transporte urbano. La actividad está planificada para desarrollarse en el segundo semestre de 2018.

Complementariamente, se planifica la realización de pasantías de estudiantes: i) pasantía de estudiante de posgrado de la Universidad Veracruzana en la Universidad de la República, para trabajar en el procesamiento de grandes volúmenes de datos de movilidad. Se propone generar matrices de demanda (origen-destino) a partir de los datos recolectados por el ITS presente en la ciudad de Montevideo y por la aplicación móvil. Se validarán los resultados alcanzados frente a resultados de encuestas realizadas en el pasado por las autoridades. El resultado al finalizar la pasantía consistirá en un informe sobre el análisis de movilidad desarrollado; ii) pasantía de un estudiante de la Universidad de la República en la Universidad Veracruzana para trabajar en el análisis de movilidad y en la implementación de técnicas de inteligencia computacional para resolver problemas relevantes en la ciudad de Poza Rica. El resultado consistirá en un informe sobre la movilidad en Poza Rica y un conjunto de herramientas aplicadas a resolver los problemas de movilidad identificados. Ambos resultados serán entregados a las autoridades de la ciudad para ser considerados por los tomadores de decisión; iii) pasantía de un estudiante del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada en la Universidad de la República para trabajar en la implementación de herramientas de inteligencia computacional para la resolución de los problemas definidos como relevantes en el contexto del proyecto y iv) pasantía de dos estudiantes de la Universidad de la República en el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada para trabajar en la implementación de técnicas de inteligencia computacional para la resolución de los problemas de movilidad identificados en las etapas anteriores del proyecto.

4.4 Actividades de investigación

El proyecto propone desarrollar un conjunto de actividades de investigación que incluyen el estudio de problemas relevantes, reuniones científicas y elaboración de reportes e informes.

Formulación de problemas y diseño de herramientas de inteligencia computacional. Esta actividad contempla la formulación de los problemas de movilidad identificados como interesantes, como problemas de optimización matemática. Una vez definidos, se propone diseñar herramientas de inteligencia computacional que permitan resolver los problemas de forma eficiente. El resultado de esta actividad es un documento con la formulación matemática de los problemas identificados y la implementación de técnicas de inteligencia computacional para su resolución.

En este contexto, se ha avanzado en la formalización de problemas relevantes para la planificación de transporte público, incluyendo la relocalización de paradas y la sincronización de frecuencias de transporte público. Para el primer problema se ha propuesto un enfoque de resolución aplicando algoritmos evolutivos, que ha permitido calcular soluciones que mejoran a la realidad actual para escenarios en Montevideo [5]. El problema de sincronización de frecuencias abordado en el proyecto busca mejorar la experiencia de los pasajeros en dos aspectos: i) evitar el fenómeno de agolpamiento de autobuses (*bus bunching*) y ii) minimizar los tiempos de espera al realizar un trasbordo entre líneas. Para solucionar los problemas se propone ajustar las frecuencias de autobuses que comparten una porción significativa de su recorrido, de forma de minimizar el tiempo de espera medio de los pasajeros en la parada y ajustar la frecuencia de pares de líneas en puntos con alta demanda de trasbordos, para minimizar el tiempo de espera de los pasajeros entre el descenso del primer autobús y el ascenso al siguiente. Con este fin es necesario definir aquellos puntos con alta demanda de trasbordos, para en ellos sincronizar las frecuencias.

La identificación de puntos con alta demanda de trasbordos se realiza a través del análisis de datos provenientes de ITS. En el caso particular de Montevideo, los pasajeros pagan su viaje con su tarjeta inteligente al abordar el primer autobús. Luego pueden abordar otros autobuses durante el período de validez del viaje, presentando su tarjeta inteligente en cada bus. Los ascensos a los buses quedan registrados y asociados a la tarjeta, y es necesario estimar los puntos de descenso. Asumiendo que los pasajeros evitan caminar en exceso al realizar los trasbordos, se considera que un pasajero termina la primer etapa de su viaje en la parada más cercana al origen de la segunda etapa de su viaje, y así sucesivamente. De esta forma se puede estimar el destino del primer viaje, buscando la parada más cercana de esa línea a la parada de origen del siguiente viaje en la secuencia [12].

Como ejemplo del análisis, la Fig. 3 presenta las 50 paradas de autobuses con mayor demanda de trasbordos en Montevideo, de acuerdo al procesamiento de datos de mayo de 2015. Los círculos tienen un tamaño proporcional a la cantidad de trasbordos realizados. Se observa que la gran mayoría de trasbordos se realizan en terminales o intercambiadores especialmente construidos para esta función, a pesar de que el sistema de transporte permite a los pasajeros realizar trasbordos en cualquier parada y entre cualquier línea. Asimismo, se observa una mayor cantidad de trasbordos en la periferia de la ciudad, donde el trazado de líneas hace que sea indispensable realizar trasbordos para llegar a determinadas ubicaciones.

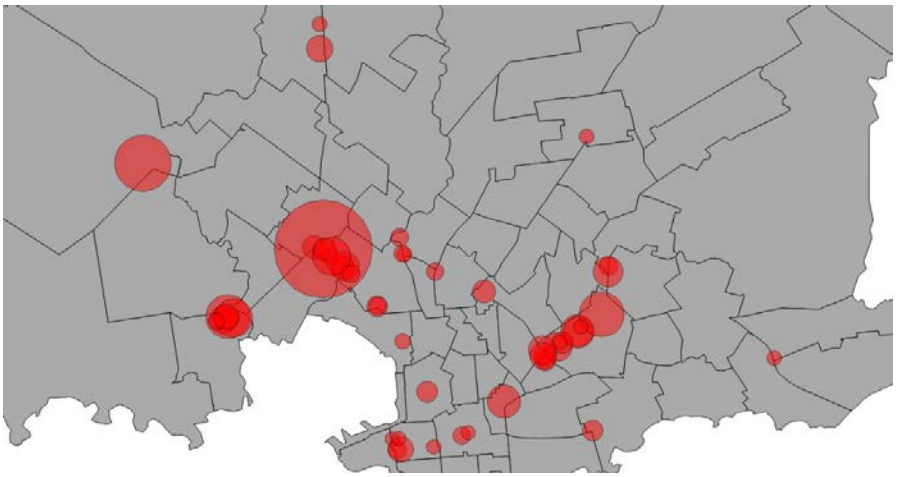


Fig. 3. *Paradas de autobuses con mayor demanda de trasbordos en Montevideo.*

Reuniones científicas. El proyecto propone realizar actividades científicas en las instituciones participantes, con la participación de investigadores y de estudiantes de cada una de las instituciones participantes. La primera reunión está prevista para celebrarse en Ensenada, en la primera semana de octubre de 2018. Las reuniones en Montevideo y Poza Rica se realizarán en el primer semestre del año 2019.

Publicaciones e informes. Se propone la redacción de al menos dos artículos científicos a ser publicados en revistas y/o conferencias internacionales en la temática de movilidad y transporte inteligente. Asimismo, se elaborarán informes parciales y una memoria final del proyecto, para describir las actividades alcanzadas, los logros obtenidos y las principales líneas de trabajo futuro. El informe final será entregado a las autoridades de las ciudades involucradas para que los resultados del proyecto sean considerados por los tomadores de decisión. Asimismo, se publicará una versión en línea para que quede disponible públicamente para la comunidad científica.

4.5 Difusión y transferencia de conocimientos

El proyecto propone realizar eventos de difusión y reuniones con los tomadores de decisiones en las ciudades que participan en la propuesta. Los eventos se realizarán en las tres ciudades que participan en la propuesta, con el objetivo de compartir los principales avances del proyecto ante investigadores de la región, estudiantes, autoridades y público en general. Se extenderán invitaciones a las autoridades de las ciudades con el fin de incorporar su visión en el proyecto, definir áreas prioritarias de acción, un plan de comunicación durante el transcurso del proyecto, un marco común para el intercambio de datos y un plan para asegurar la sustentabilidad de los esfuerzos de cooperación una vez culminado este proyecto específico. El proyecto también propone realizar una reunión de difusión y transferencia de conocimientos en la ciudad de Camagüey, con la participación de investigadores de todas las universidades involucradas en el proyecto. Se propone elaborar un documento de transferencia de conocimientos que permita aplicar los conocimientos generados en el proyecto a la realidad de otras ciudades.

5. Conclusiones, trabajo actual y futuro

Este artículo presentó el proyecto 'Planificación de transporte urbano en ciudades inteligentes' que surge de la colaboración de grupos de investigación de Uruguay y en México en el marco del programa 'Fondo Conjunto de Cooperación Uruguay–México'. El proyecto plantea el estudio y desarrollo de metodologías de análisis y diseño para el apoyo a la toma de decisiones relativas a la movilidad y el transporte urbano bajo el paradigma de las ciudades inteligentes.

Los principales problemas abordados en el marco del proyecto incluyen: el análisis de demanda de movilidad, la planificación de recorridos y frecuencias del transporte público y de redes alternativas de desplazamiento (e.g., peatones y ciclovías), y la planificación inteligente de semáforos. Para la resolución de estos problemas se propone el uso de técnicas de inteligencia computacional que toman en cuenta los intereses de los ciudadanos, las autoridades y las empresas de transporte. En forma complementaria, el proyecto prevé la formación de estudiantes a nivel de grado y posgrado en la temática, la realización de reuniones científicas y la difusión de los resultados alcanzados tanto a un público experto como no especializado.

Las líneas de trabajo actual y futuro incluyen el desarrollo de una aplicación móvil para la recolección de datos de movilidad, la formulación de problemas y el diseño de herramientas de inteligencia computacional para la resolución de los problemas identificados y la realización de las actividades científicas, de formación y de difusión programadas en el marco del proyecto.

Reconocimientos

La investigación reportada en este artículo es financiada por el programa 'Fondo Conjunto de Cooperación Uruguay–México' AUCI–AMEXID.

6. Referencias

[1] F. Ahmed y Y. Hawas. An integrated real-time traffic signal system for transit signal priority, incident detection and congestion management. Transportation Research Part C: Emerging Technologies **60**, 52–76 (2015).

[2] A. Ceder. Public Transit Planning and Operation: Modeling, Practice and Behavior, Butterworth-Heinemann, Oxford (2007).

[3] C. Chen, J. Ma, Y. Susilo, Y. Liu y M. Wang. The promises of big data and small data for travel behavior (aka human mobility) analysis. Transportation Research Part C: Emerging Technologies **68**, 285–299, (2016).

[4] M. Deakin y H. Al Waer. From intelligent to smart cities. Intelligent Buildings International **3**(3), 133–139 (2011).

[5] E. Fabbiani, S. Nesmachnow, J. Toutouh, A. Tchernykh, A. Avetisyan, G. Radchenko. Analysis of mobility patterns for public transportation and bus stop relocation. Programming and Computer Software (2018) [in press].

[6] L. Figueiredo, I. Jesus, J. Machado, J. Ferreira y J. De Carvalho. Towards the development of intelligent transportation systems. In Intelligent Transportation Systems **88**, 1206–1211 (2001).

[7] S. Grava. The promises of big data and small data for travel behavior (aka human mobility) analysis, Urban Transportation Systems. McGraw-Hill Professional (2002).

[8] W. Lam y M. Bell. Advanced Modeling for Transit Operations and Service Planning, Emerald Group, Bingley, UK (2002).
[9] J. Lee y B. Park. Development and Evaluation of a Cooperative Vehicle Intersection Control Algorithm Under the Connected Vehicles Environment. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems **13**(1), 81–90 (2012).
[10] R. Massobrio, G. Fagúndez, S. Nesmachnow. Multiobjective evolutionary algorithms for the taxi sharing problem, International Journal of Metaheuristics **5**(1), 67–90 (2016).
[11] R. Massobrio, A. Pías, N. Vázquez y S. Nesmachnow. Map-Reduce for Processing GPS Data from Public Transport in Montevideo, Uruguay, 2º Simposio Argentino de Grandes Datos, Buenos Aires, Argentina (2016).
[12] R. Massobrio, S. Nesmachnow. Análisis de datos de movilidad del transporte público de Montevideo. XIX Congreso Latinoamericano de Transporte Público y Urbano, pp. 1–11 (2016).
[13] E. Mumford. Designing Human Systems for New Technology: The ETHICS Method. Manchester: Manchester Business School (1983).
[14] S. Nesmachnow, E. Arreche, R. Massobrio, C. Mumford, A. Olivera y P. Vidal. Traffic light optimization for Bus Rapid Transit using a parallel evolutionary algorithm: the case of Garzon Avenue in Montevideo, Uruguay, XVIII Latin-Iberoamerican Conference on Operations Research, Santiago, Chile (2016).
[15] D. Peña, A. Tchernykh, S. Nesmachnow, R. Massobrio, A. Drozdov, S. Garichev. Multiobjective vehicle type and size scheduling problem in urban public transport using MOCell. IEEE International Conference on Engineering & Telecommunications, pp. 110–113 (2016).
[16] D. Peña, A. Tchernykh, G. Radchenko, S. Nesmachnow, J. Ley-Flores, R. Nazariega. Multiobjective Optimization of Greenhouse Gas Emissions Enhancing the Quality of Service for Urban Public Transport Timetabling. IV IEEE International Conference on Engineering & Telecommunications pp:114–118 (2017).
[17] D. Peña, A. Tchernykh, S. Nesmachnow, R. Massobrio, A. Feoktistov, I. Bychkov. Multiobjective Vehicle-type Scheduling in Urban Public Transport. In IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium Workshops, pp. 482–491 (2017).
[18] D. Peña, A. Tchernykh, S. Nesmachnow, R. Massobrio, A. Feoktistov, I. Bychkov, G. Radchenko, A. Drozdov y S. Garichev. Operating Cost and Quality of Service Optimization for Multi-Vehicle-Type Timetabling for Urban Bus Systems. Journal of Parallel and Distributed Computing (2018) [in-press]
[19] M. Péres, G. Ruiz, S. Nesmachnow y A. Olivera. Multiobjective evolutionary optimization of traffic flow and pollution in Montevideo, Uruguay, Applied Soft Computing **70**, 472–485 (2018).
[20] C. Rey y O. Cardozo. La vulnerabilidad y la movilidad urbana. Capítulo 11 de Aportes conceptuales y empíricos de la vulnerabilidad global (A. Foschiatti, ed.). Universidad Nacional del Nordeste, Argentina (2007).
[21] C. Reynolds, M. Harris, K. Teschke, P. Cripton y M. Winters. The impact of transportation infrastructure on bicycling injuries and crashes: a review of the literature. Environmental Health, 8–47 (2009).
[22] R. Ríos, A. Taddia, C. Pardo y N. Lleras. Ciclo-inclusión en América Latina y el Caribe: guía para impulsar el uso de la bicicleta - Banco Interamericano de Desarrollo. [Online] https://publications.iadb.org/handle/11319/6808. Accedido en mayo de 2018.
[23] J. Sánchez, M. Galán y E. Rubio. Applying a Traffic Lights Evolutionary Optimization Technique to a Real Case: “Las Ramblas" Area in Santa Cruz de Tenerife. IEEE Transactions on Evolutionary Computation **12**(1), 25–40 (2008).
[24] D. Washburn, U. Sindhu, S. Balaouras, R. Dines, N. Hayes, y L. Nelson. Helping CIOs Understand ‘Smart City’ Initiatives: Defining the Smart City, Its Drivers, and the Role of the CIO” Cambridge, MA Forrester Res. Inc. (2010).

Towards the Smart Museum: Challenges from Lab Experimentation to Deployment

Borja Barinaga López[1], Isidro Moreno Sánchez[2], Gonzalo Martín Sánchez[3], Edmond C. Prakash[4], Diego F. Loaiza Buitrago[5], Andrés A. Navarro-Newbal[6], and Victoria E. Contreras R.[7]

[1] Universidad Francisco de Vitoria de Madrid
borja@lapevil.com
[2] Universidad Complutense de Madrid, Madrid, Spain
ims@ucm.es
[3] Universidad Nebrija, Campus Berzosa y Fundación, Madrid, Spain
almanzor@gmail.com
[4] Cardiff School of Technologies, Cardiff Metropolitan University, Cardiff, Wales
CPrakash@cardiffmet.ac.uk
[5] Universidad Santiago de Cali. COMBA I+D Research Group, Cali, Colombia
diego.loaiza02@usc.edu.co
[6] Pontificia Universidad Javeriana, Cali, Colombia
anavarro@javerianacali.edu.co
[7] Pontificia Universidad Javeriana, Cali, Colombia
victoriaecontrerasr@hotmail.com

Abstract. Smart museums require a symbiosis between technology and exhibitions so that complex patrimonial content is delivered to visitors. Technology must not only be "transparent" and used to enrich the exhibitions, but also it should provide the opportunity to allow creative processes from the visitors. Additionally, technology within the museum should be integrated in a way the virtual museum supports on-site interactive systems and is related to objects and mobile or IoT applications that augment the exhibition making it accessible. To achieve this, museums must have networking capabilities which allow WIFI and cloud computing access in a way information is available and can be analysed and evolved. However, there are great challenges in developing technology-based systems in such a manner, particularly, when we want to take an application from the laboratory environment and deploy it in a museum. We summarise our previous developments, then we discuss a case that could not finally be deployed and explore further lines of research that may contribute to the process of building a smart museum for a smart city.

Keywords: Smart Museum, Interactive System, Mixed Reality, Tangible User Interface, Smart Object

1 Introduction

According to the United Nations [1], "everyone has the right to take part freely in the cultural life of the community, to enjoy the arts and to participate in scientific progress and the benefits that result from it." Thus, it is clear that universal accessibility is a right of all people. However, compliance can only be achieved through the particular laws of each country that sometimes are very lax and focus on aspects of physical accessibility only. Universal design or design for all people should not only take into account the limitations in the physical plane, but also those referred to sensory, cognitive, psycho-social and also aesthetic. We must start from the real fact that all people are diverse, and we have limitations and it is imperative to banish exclusionary concepts such as handicaps and even disabilities. Cultural spaces have been adapted to all this terminology and the change in the conception of disability over time. So they have been eliminating the physical barriers, first; then, the sensory ones, and are just beginning to confront the most difficult intellectual, psychosocial and aesthetic. There are more and more conferences and publications that address inclusion and diversity [2]. Universal accessibility is the condition that environments, processes, goods, products and services must fulfil, as well as objects or instruments, tools and devices to be comprehensible, usable and practicable by all persons in conditions of safety and comfort and In the most autonomous and natural way possible. The principles of design for all or universal design developed by the Center for Universal design [3], which describe the characteristics that a product or system has to fulfil to be accessible (equity, flexibility, simplicity, efficiency, tolerance, comfort and proportionality), show that the cultural and leisure spaces are still far from providing this sort of design to all visitors.

Information and communication technologies (ICT) are one way to approach accesibility. Indeed, the demand for accessible solutions is not only restricted to the scope of the home but also to mobility in means of transport bus, metro, train or plane , open environments cinemas, libraries, museums, airports or shopping centres. Therefore, public and private entities should ensure compliance with ICT legislations so that they are accessible and efficiently and effectively manage human resources and materials needed to realise the Information society accessible to all and without discrimination [4]. As stated earlier, policies depend on countries and some countries are approaching the matter differently. While policies are sorted out, we present our first steps towards smart museums. In Section 2, we start discussing some previous work related to smart museums. Then, we discuss our successful previous work. Next, we focus our discussion on techniques and technologies to allow interaction with real objects, to provide accessibility. We review mixed reality environments and tangible user interfaces. In Section 3, we describe the Tlingit Adventure and the challenges behind it. We discuss cascade classifiers as a tool to solve the technicalities of the problem and we show how we iterated through several prototypes to build the system. Section 4 is probably the most relevant one. Here, we highlight our results and the final failure of the system within a real environment. Our choice of cascade classifiers came out to be a bad idea. The whole point of Section 4 is to show evidence on

how a complex process may lead to unsatisfactory results. Indeed, it evidences some of the challenges that may appear when trying to deploy and accessible system in a museum. Overall, making a smart museum is a challenging task. We end with a brief discussion, some conclusions and further work that could make our system work.

2 Related Work

Korzun et al. [5] introduce a novel smart museum concept based on intelligent services which are used to enrich the museum's collection, including knowledge acquired from museum's experts and visitors. They follow the smart spaces approach for an IoT museum environment proposing a semantic infrastructure. Hashemi, Kamps and Hupperetz [6] focus on understanding user's onsite physical behaviour and show that IoT can be used to understand visitor's information needs. Mighali et al.[7] propose an architecture to improve the cultural experience of the user which includes connectivity, wearable devices, mobile devices, multimedia data in the cloud and a processing centre. While all these ideas are important for implementing the smart museum, none of them have a focus on the visitor's interaction. Instead, the focus is on technological developments. Our work explores alternative forms of interaction which take advantage of the virtual continuum. We describe some considerations when trying to include real objects in museum's exhibitions making it behave like a smart object.

The virtual continuum is a line which goes from real environments at one end to virtual environments at the other. Real environments contain only real objects while, in theory, virtual environments fully immerse a user within a digital synthetic world. Mixed Reality (MR) is in the middle of the virtual continuum. Here, real-world and virtual objects interact and are displayed in a combined way [8]. Augmented reality (AR) enriches information presented by reality with digital content, while augmented virtuality (AV) incorporates visualisations of real objects within a virtual environment. AV and the AR are different in that in the first, the proportion of visualisation of virtual elements is greater than that of real elements [8]. Within this continuum, we explored the idea of mixing real museum objects with virtual elements provided by the on-site interactive systems. In some cases, we created complementary mobile applications. Visitor-object interaction in a museum may be desirable to deliver complex knowledge through the interactive system.

Table 1 summarises our previous work. We evidence that our most successful systems were on-site systems (e.g. the Chimú Adventure and the Interactive Radio), providing some sense of smartness to the exhibitions as these systems sensed the presence of visitors and responded accordingly. Probably, the mobile applications were not properly promoted or were not as usable as we expected. The systems integrated with the real world using real objects as a mean to provide additional information. For example, the Interactive Radio provided additional information using a speech, while the Chimú Adventure allowed to observe real objects within the context of the virtual system. However, the proposed visitor-

Table 1. Interactive systems taking advantage of the virtual continuum.

System	Description	Limitation
Chimú Adventure [9]: available from 2014 to 2017 at the Museo de América in Madrid	It allowed the user to impersonate and archaeologist who finds the Tantalluc pyramid from the Chimú culture in Peru. The archaeologist had to find all the treasures inside using body gestures	A sensor detects the visitor's gestures. Sometimes there may be slight vibrations and the system only allows interaction with one user at a time. Only selected treasures had their associated real counterpart. However, the system brought fun and knowledge to visitors for three years.
Chimú - RA [10]: Museo de América in Madrid	It was a mobile application used to provide multimedia content associated to some Chimú objects. It superimposed multimedia content over an object detected with a mobile device.	It offered a selective interaction. The user had to point the mobile device's camera towards the label of the object in the exhibit as the illumination conditions at the museum were too dark to allow direct object recognition. The application was not too popular among users resulting in a few downloads only.
Towards Tantalluc [10]: Museo de América in Madrid	It was an enhancement of Chimú-RA aimed to favour museum visitors to walk the museum looking for Chimú objects through a narrative. It was an AR game where the visitor was a Chimú indigenist creating the objects to be taken to the Tantalluc pyramid. When the visitor finished building the object, he or she could use the mobile device to detect the object and get augmented information.	The idea was that the objects buried in the pyramid were the same objects that were to be discovered in Chimú Adventure. However, the application was only downloaded by the researchers and never by the visitors.
Interactive Radio [11]: available from October 2013 to April 2014 at the Museo La Merced in Cali	It was a radio device emitting white noise until it detected a visitor. Then, it tuned in and started a speech related to the exhibition. The radio was itself the object. It consisted of a small PC and a camera embedded in the body of an old radio device. Visitors were detected using a motion detection algorithm.	The radio was located at the end of the exhibit so its existence was not obvious for the visitors. However, many visitors enjoyed it.

object interaction did not include possibilities such as capturing real museum objects and augmenting knowledge about them. With our next attempt, Tlingit Adventure for the Museo de América in Madrid, we wanted to achieve this. This meant the use of a Tangible Using Interface (TUI) [12] (e.g. a helmet replica. from a Tlingit warrior from North Amrica). TUIs look forward for enhancing human computer interaction using a more natural mean such as analogue real objects.

Interaction devices from video games technology such as the Microsoft's Kinect have allowed incorporating features of interaction of tangible interfaces to MR environments [12]. Tangible interfaces allow users to use common objects in the real world as interactive elements in MR environments, mimicking the intuitive behaviours of natural life in these environments [12]. Subject-object interaction in a museum exhibit can be thought of as the capture of rigid museum objects, gestures and tasks performed by visitors. MR has the potential of increasing the perception and interaction with the real-world aiding knowledge accessibility. The fundamental process that enables MR is tracking, which continuously captures or detects the position of real objects [8]. Then, the process of registration requires virtual content overlaid on the capture of the real scene. Image tracking techniques based on fiducial markers are used in MR environments because recognising this sort of visual pattern is easier and there are reliable algorithms available. However, fiducial markers do not take advantage of the environment's natural features [8]. This hinders the adoption of MR in fields in which the use of such markers is not practical, such as outdoor environments and museums exhibitions. Marker-less MR use Natural Feature Tracking (NFT) techniques to take advantage of the natural characteristics of the real objects. However, there are still challenges in NFT [13] related to handling environmental conditions (e.g. lighting), which are common or persistent problems in the museum environment.

Avatars help impersonate the user in a MR. An avatar is the embodiment or a virtual representation of the user in a MR or virtual environment [14]. Avatars help the user to identify himself or herself and to interact with the objects within a virtual environment. They obey to physical rules and narrative present in the virtual world which they inhabit [14]. However, avatars generally move in the virtual world disconnected from the real world in which the user remains.

Solutions for marker-less MR applications include computer vision algorithms, machine learning, and using natural interaction devices such as the Microsoft's Kinect sensor, which has a transmitter and an infrared detector. Neumann and You [15] propose an architecture to allow tracking of the natural characteristics of an object using optical flow. Lee and Hollerer [16] describe a tracking system based on the detection of the fingertips which uses a colour segmentation algorithm. Schall et al. [17] propose a technique adequate for outdoor AR which uses a natural feature detector which is enhanced with the use of classifiers. Hinterstoisser et al. [18] use the Kinect to obtain depth information through its infrared sensor to build templates for the 3D objects to perform their detection.

Regarding avatars, Pensyl et al. [19] describe a MR environment where the user interacts with virtual avatars using a head mounted display and the Nintendo's Wii Motion sensor. Nagendran et al. [20] describe a system to allow user communication using virtual and physical avatars. Weil and de la Peña [21] present a system where the avatar is encapsulated within a narrative and transfers information to the user. There are some references of avatar usage in museums. Mu, Yang and Zhang [22] propose the use of avatars which incorporate user gestures, but the system is limited to a virtual museum. Roussou et al. [23] present a robotic avatar to allow remote museum walks. In Chimú Adventure (Table 1) the user enacts an archaeologist discovering an ancient pyramid and interacts using body gestures. Here, the user must manipulate virtual tools. He or she receives instruction from two characters representing archaeologists from the expedition; however, the user only can visualise a virtual representation of his or her hands.

3 Mick, A Tlingit Adventure

We proposed a MR application which was aimed to function as an on-site interactive system for the Tlingit exhibition at The Museo de América in Madrid (Fig. 1A). The Tlingit are indigenous people of the Pacific Northwest Coast of North America [24]. In Mick, the user is enabled to learn about the Tlingit culture. The user interacts through a TUI, the replica of a war helmet (Fig. 1B), and virtual content is superimposed in this replica, one piece of audio visual content for each helmet side. Next, the user puts the helmet on, and he or she becomes a Tlingit warrior (Mick) who is visualised in the form of an avatar. The avatar needs to dress up and then go to war. The helmet helps connect the avatar with the real world and the user. To implement Mick, we had to overcome several challenges: (1) the helmet has a printed pattern on the rear face, and specific features on each side. Each side of the helmet had to be detected without using markers. At this point the user is in an AR world; (2) at the exhibit illumination is low to preserve artefacts; (3) to allow interaction, the system had to handle affine transformations such as scaling and rotation which come from the distance of the helmet and the movements the user can make with it. In our scenario the distance between the camera and the helmet had to be 1.5 metres; (4) the system had to handle reflections, shadows and partial occlusion of the helmet caused by user interaction; (5) we needed to detect the moment when the user puts the helmet on to start the enactment of Mick by the user; (6) once with the helmet on, the system had to detect gestures from the user. At this point he or she is displayed in a Tlingit hut dressing up for war. At his point the user is in an AV world.

We had integrated two modules. The first module displayed audio-visual information related to each side of the helmet (AR module). The second module allowed avatar control from the user (AV module). For the first module we relied on the Kinect's RGB camera for helmet's sides detection purposes. This way, we believed, we could deploy this module with a simple web cam. We had a

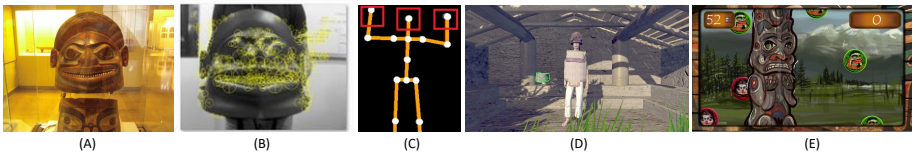


Fig. 1. Tlingit. A) Exhibition. B) Helmet replica. C) Colliders. D) Avatar. E) War game.

variable background, where variability was caused by people passing behind the interaction area (Fig. 1C). Thus, we could not use colour segmentation [16, 18]. Instead, we followed a cascade classifiers approach which is commonly used in face detection [25], but had not been used in a problem similar to the one we proposed. In the second module the user enacted the Tlingit warrior, Mick, dressing up and going to war. We relied on the Kinect's depth sensor to get the user's skeletal data and understand his or her gestures (similar to Mu, Yang and Zhang [22] but in a real museum) and for detecting when the users put the helmet on, overcoming wiring limitations. The avatar was rendered with realistic textures and shadows to provide immersion, overcoming realism limitations such as the ones present in Weil and de la Peñ a [21]. Interaction is limited to selecting pieces of clothes and enemies' helmets to ease user interaction at the museum. Thus, avatar motion is limited, similar to Nagendran et al. [20], and encapsulated in a narrative, like the avatars in Weil and de la Peña [21], but totally controlled by the user. The avatar is displayed fully and the user puppets is smoothly moved (as opposed to Chimú Adventure) as long as there are no obstacles between the user and the camera. Tangibility (TUI) was implemented with the helmet, an object belonging to the avatar, which was aimed to connect the AR and AV worlds for the user.

Cascade classifiers [26] is a supervised machine learning method aimed to have a faster recognition rate. Classifiers analyse only the important regions of images and help determine if an object appears or not in it. Training classifiers requires images that contain (positive) and do not contain (negative) the object. Our classifier was based on features [27] which were more efficient than pixel operations. The stages for the implementation of the classifier included: preparation of positive samples in varying positions and illumination conditions; preparation of negative samples and; classifier training. Using the recognition of the different sides of the helmet, we varied parameters and ambient conditions to find the right combination of parameters for an adequate performance. In Mick, we needed to determine the existence of any of the four sides of the helmet in the image. To achieve this, we implemented a cascaded [27] assembly of classifiers for the four sides of the helmet. Then, we used the confusion matrix [28] to measure the performance of the classifier's assembly. This matrix showed the number of effective detections versus the number of detections assigned to other class. We tested with natural and artificial illumination to show that illumina-

tion affects the performance of the classifier. We made variation in the type of training (positive images tagged); size of object sample; and number of positive and negative images. At the detection stage, the detector was applied in each video frame of video. Positive and negative images were obtained directly from video recordings at the exhibit site.

We followed an iterative spiral methodology [29]. This allowed us to test our classifiers, so we could enhance them to achieve higher recognition rates in the AR module. Also, this allowed us to enhance the AV module from rapid prototypes that were evaluated with several users, making them interact with the system and filling in a questionnaire. We used the instrument described below and performed two usability evaluations. Here, each affirmation had to be rated between 0 totally disagree to 5 totally agree. Both usability tests were performed with 18 participants from one university with ages between 18 and 62 years old. Participants used the system and answered the instrument: (1) Mick is easy to use; (2) Mick is entertaining; (3) Mick is visually appealing, (4) Mick has hearing clues that are enough to understand what I have to do; (5) Mick has textual clues that are enough to understand what I have to do; (6) the recognition time for each helmet side occurs within a reasonable time; (7) the transition between the AR and AV modules is clear; (8) it is clear what I have to do when the avatar is dressing up; (9) the transition between the dressing up level and the war game is clear; (10) I understood how I should put the helmet on; (11) I understood when I should put the helmet on; (12) the war game's objective was clear; (13) I liked the interactive system, Mick; (14) I think Mick is interesting; (15) I think Mick is useful; (16) I felt identified with the avatar; (17) I learnt something about the Tlingit culture. Additionally, the instrument included the following two open questions: What would you add to Mick to make it more usable in general?; what would you add to the war game to make it more entertaining?

4 Results

The application was implemented in Processing and Unity Personal Edition 5.0. The application is executed through two main modules, AR and AV. AR oversees showing audio visual information. AV oversees allowing avatar control from the user once he or she wears the helmet. After initialisation, the application starts the main AR loop. First, it captures the next video frame. Then, it pre-processes it taking data from a region of interest (ROI), converts it to grey scale and equalises the histogram. Next, it starts the detection by calling a classifiers ensemble. At this point, it shows content according to the side of the helmet which was detected. Finally, after the loop ends, the video capture ends, the resources are released and the AV module is called. Fig. 1D shows the avatar dressing up thanks to user control. Fig. 1E displays a simple war game consisting on taking red (enemy) shields and letting the green ones go. Here, we used skeletal information captured by the Kinect sensor to move the avatar according to the user's movements and to choose a piece of cloth. Also, we used it to detect

when a user's hand touches a helmet in the war game and finally we used it to detect if the user had put on the helmet. To do this, we compare the distances between the wrists and the head using colliders (Fig. 1C).

Table 2 shows the average results obtained from applying the instrument described in Section 3. It can be seen, that for most people, Mick is easy to use, entertaining and visually appealing (Affirmations 1, 2 and 3). This happened in both iterations, but in the second evaluation the marks were higher. Hearing clues (Affirma-tion 4) seem to be fine, while the lack of textual clues (Affirmation 5) is evident, getting the lower marks in both iterations. Affirmations 6 and 7 were applied in the first evaluation only. Here, slow recognition of the helmets sides was put in evidence. Affirmations 8 to 12 evidenced that Mick was clear at different moments; however, it seems that the way the helmet should be put on was clearer in the first evaluation (Affirmation 10). In both evaluations, the users seemed to like the system and considered interesting and useful (Affirmations 14 and 15). It is interesting to see how the users identified with Mick to some extent, the avatar, even though the user could not change its gender or its age (Affirmation 16). Finally, most users considered they learnt something about the Tlingit culture (Affirmation 17). At the end, during the second evaluation, the mark was slightly higher (4.4).

Table 2. User validation.

Question	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	Average
First iteration	4	4.6	4.2	4.2	3.1	3.2	4.3	4.3	4.3	4.8	4.7	4	4.4	4.6	4.6	4	4	4.2
Second iteration	4.6	4.5	4.8	4.3	3	No	No	4.3	4.2	4.3	4.7	4.4	4.5	4.7	4.6	4.1	4.3	4.4

Overall, in the first evaluation round, thanks to the answer to the open questions and our observations, we found that we needed to implement changes such as:speeding up helmet recognition, which required further training for the AR module; enhancing the way the system detected when the user puts the helmet on (adjusting colliders, Fig.11C) in the AV module; highlighting the virtual avatar's objects using sounds and colours to ease the dressing up stage in the AV module; enhancing dagger movement during the war game in the AV module; and adding other minor user interface aids such as text and sounds, for example, when enemy helmets are destroyed in the war game. In the second evaluation round, most of these problems were corrected, but we still needed, the textual aids, and some minor user interface changes and animations for destroying helmets in the war game were suggested.

4.1 Testing Classifiers in the Laboratory

For the final training, we decided to tag the whole side of the helmet within the scene for each of the four cases (front, rear, left and right). We used 3000 negative images and 1500 positive tagged images (taken from video footage at the museum). Experiments at the laboratory showed that the false positive rate

was low while the true positive rate was high for all classifiers and apparently, they did not behave randomly. Threshold detection was set as a 65% value. The maximum time for the detection of a side of the helmet was 8 seconds for the left and right sides and 6 seconds for the others. Table 3 shows the confusion matrix. Fig. 2 shows correct detection and functioning in the laboratory.

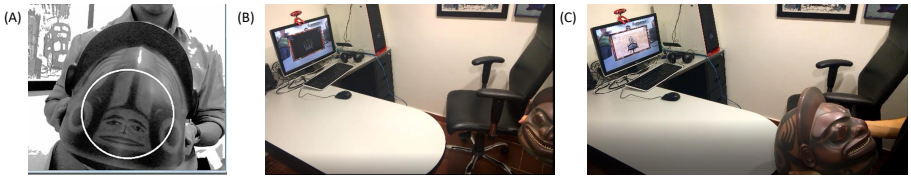


Fig. 2. Laboratory setup.A) Preliminary detection of rear face. B) Definite right head detection displaying video. C) Definite rear face detection displaying video.

Table 3. Confusion matrix.

Helmet side / Detected side	**Frontal**	**Rear**	**Left**	**Right**
Frontal	78%	3%	2%	2%
Rear	2%	71%	4%	3%
Left	2%	13%	67%	15%
Right	2%	9%	14%	65%

4.2 Museum Set Up

Fig. 3 shows the setup at the Tlingit exhibition in the Museo de América. The AV module is working properly (Fig. 3E and F). Detection had some problems. Fig. 3A and B show that the system is still detecting some false positives. This is related to contributions from the right and left side classifiers, which require more training. In Fig. 3C there is evidence that the frontal side of the helmet has more distinguishable features and was easily recognised in both the museum and the laboratory environment. Fig. 3D shows that the rear side of the helmet is distinguishable, but due to its low contrast, requires more illumination and more training. While Mick worked fine in laboratory conditions, it presented problems at the museum. At the laboratory we trained Mick with the same conditions as those under which it was going to be tested. For the museum we used images from video footage taken at the museum. However, the final museum setup had a slightly different illumination configuration than the one used when the images

for training were taken (Fig 4A). We believe that a slight enhancement of the illumination conditions could benefit the system, but this is not possible as more illumination may deteriorate objects in the exhibition.

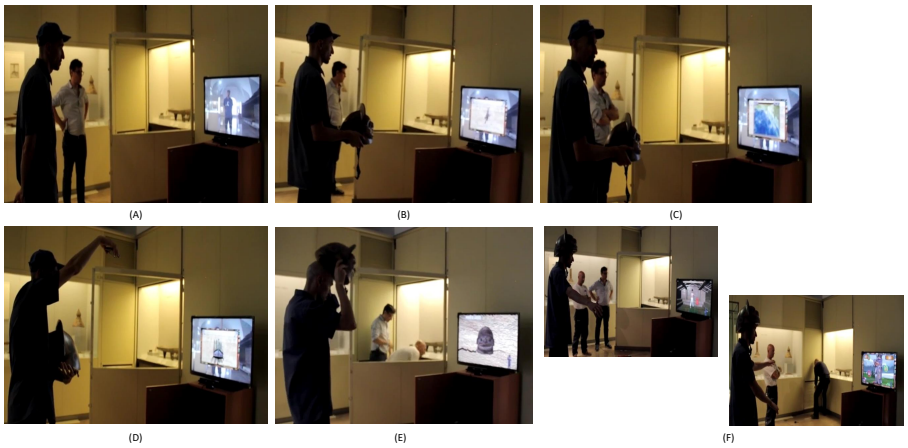


Fig. 3. Museum setup. A) A false positive starts the interactive system. B) The frontal side of the helmet is shown, but the right side is detected. C) The frontal side of the helmet is properly detected. D) The rear side of the helmet is properly detected after we applied some direct illumination. E) The system detects when the user puts the helmet on. F) The user dressing the avatar up and playing the war game.

4.3 A Solution that did not Solve the Problem

We concluded that Cascade Classifiers was not suitable technique for the real environment. Thus, we decided to implement the recognition of high intensity color segments. With this technique we managed to eliminate the problem of load time, lowered recognition time and the recognition of the object stopped behaving random. In this phase the source code was enhanced so that it was easier to adapt to other contexts. Fig. 4B. shows this last proposal. The system was validated by 4 users and although it worked well, it was criticised because the technology used (recognition of segments) was invasive, affecting the user experience (so it did not really worked). The solution requires affixing small phosphorescent segments to the different faces of the object with which it is interacting, thus bursting into the essence of the object itself.

5 Discussion

Implementing an intelligent system in a real environment requires a transformation into the museum's mentality and also a strong economic bet. Because we

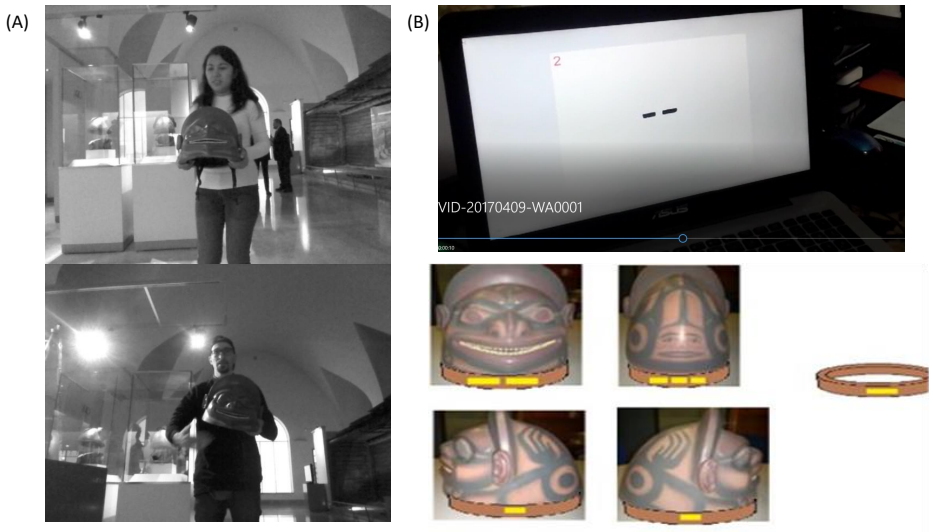


Fig. 4. A solution. A) Changes in illumination. Top, images used for the initial training at the museum. Bottom, in the final setup the camera is pointing to a different direction and the illumination conditions have changed. B) Top, detecting segments. Bottom, refractive segment ring.

would have to bet on intelligent narrative databases and systems that learn from visitors. That means, for example, putting motion sensors to study how people move around the museum, sensors in the pieces that measure how long they look at the people visiting the museum. On the other side, these narrative databases have to take into account not only what is produced in the physical museum and the interactions with the physical pieces, but what happens with the other museum forms (museum in Situ, networked museum, mobile museum, personal museum, social museum, etc.). On the other hand, these intelligent systems also must be able to improve the experience of the people ins some cases making common objects behave as smart objects.

In Smart Museums, we must follow ethical procedures, informing visitors about the role of technologhy. For example, we could explain that only data that is essential for interaction is captured, no person is identified from the data, no personal information i(age, name, id, etc) is stored or identified. All images captured are securely stored/processed. Data is not shared with any external entities. All physical movement / gesture / interaction data is processed anonymously. All data is destroyed after 6 months, etc. Participants in the user validation were aware of this and agreed to collaborate.

6 Conclusion and Further Work

The assembly of several weak classifiers performed well in laboratory conditions where the training video set was identical to the environmental conditions where the system was going to be tested. At the museum, the training set sent was different from the usage conditions; thus, we had some problems. However, we believe the better illumination conditions at the laboratory (as we were not able to replicate exact conditions from the exhibitions) affected performance of the system. We did not take advantage of the Kinect's depth sensor for face detection to make it more portable to other kinds of cameras. However, we believe a match between a 3D reconstructed obtained from the depth sensor with a 3D template model from the helmet (which we had scanned) would have worked better. The project finished, and we did not have time to implement this solution. The success of the project was affected by a bad choice of the solution. Still, cascade classifiers seem to require more training to be successful and we did not have time to probe it either.

Skeletal information was adequate for avatar control. The use of colliders eased the detection of the moment when the user puts the helmet on. Most users liked Mick and considered it interesting, useful and easy to use. To some extent users identified with the avatar, but it would be ideal to allow gender and age change from the user. The application provides flexibility, so it would be possible to in-corporate further tracking stages and new detection methods.

Adding more intelligence using cloud computing capabilities as in Korzun et al. [5], Hashemi, Kamps and Hupperetz [6] and Mighali et al. [7]. A lot of positive and negative images could have been trained that way. This statement is particularly interesting as technologies such as the Kinect have been recently moved to the intelligent cloud [30]. Cloud computing could be used to understand visitors and to store and use knowledge constructed by them, and to understand real objects in TUIs making them behave as smart objects. We could conclude that the smart museum requires intelligent cloud computing capabilities. However, this is not enough, interfaces should be natural and 'transparent' as they were in our previous successful on-site systems (Table 1). Iterative design is a good technique for this. Adding tangible elements is feasible but challenging, requiring advanced artificial intelligence. Mobile applications are important but need to be further validated within the museum environment.

References

1. Unated Nations General Assembly (1948). Universal Declaration of Human Rigth (Article 27). https://dudh.es/27/
2. The International Journal of the Inclusive Museum (2018). Disponible en: http://onmuseums.com/journal
3. Center for Universal Design (2018). http:// www.ncsu.edu/ncsu/design/cud/
4. Afimde (20018). Asociación para la Formación e Integración de Personas con discapacidad al Deporte y al Empleo. https://afimde.wordpress.com/tag/centro-nacional-tecnologias-de-accesibilidad/

5. Korzun, D., Varfolo-meyev, A., Yalovitsyna, S., Volokhova, V. Personal Ubiquitous Comput., 21(2), 345- 354 (2017). Semantic infrastructure of a smart museum: toward making cultural heritage knowledge usable and creatable by visitors and professionals. DOI: https://doi.org/10.1007/s00779-016-0996-7
6. Hashemi, S.H., Kamps, J., Hupperetz, W. Busy versus Empty Museums: Effects of Visitors' Crowd on Users' Behaviors in Smart Museums. In: Tkalcic, M., Thakker, D., Germanakos, P., Yacef, K., Paris, C., Santos, O. (eds.). Adjunct Publication of the 25th Conference on User Modeling, Adaptation and Personalization (UMAP '17), pp.333-334. ACM, New York, NY, USA (2017). DOI: https://doi.org/10.1145/3099023.3099088
7. Mighali, V., Del Fiore, G., Patrono, L., Mainetti, L., Alletto, S., Serra, G., Cucchiara, R. Innovative IoT-aware Services for a Smart Museum. In: Proceedings of the 24th International Conference on World Wide Web (WWW '15 Companion). pp. 547-550. ACM, New York, NY, USA (2015). DOI: http://dx.doi.org/10.1145/2740908.2744711
8. Azuma, R. Overview of augmented reality. In: ACM SIG-GRAPH 2004 Course Notes, SIGGRAPH 04, New York, NY, USA (2004).
9. Navarro-Newball, A.A., Moreno S 'anchez, I., Prakash, E., Arya, A., Contreras Roldán, V.E., Quiceno Rios, V.A., Mejía Mena, J.D., Loaiza, D.F., Lozano P., S. Multimedia Tools And Applications. 75(19), 11699-11722 (2016). Gesture based human motion and game principles to aid understanding of science and cultural practices. ISSN: 1380-7501. http://dx.doi.org/10.1007/s11042-015-2667-5
10. Perea-Tanaka, C.F., Moreno, I., Prakash, E.C., Navarro-Newball, A.A. Towards tantalluc: Interactive mobile augmented reality application for the Museo de América in Madrid. In: Computing Colombian Conference (10CCC). pp.164-171, 21-25. IEEE (2015). ISBN 978-1-4673-9464-2. doi:10.1109/ColumbianCC.2015.7333427
11. Loaiza, D.F., Prakash, E.C., Moreno, I., Navarro-Newball,A.A., Mixing Art and Technology: An Interactive Radio for a Museum Exhibition. In: Solano, A., Ordo nez, H. (eds.) Advances in Computing: 12th Colombian Conference, CCC 2017, Cali, Colombia, September 19-22, 2017, Proceedings. pp. 586-594, Springer International Publishing (2017). DOI: http://dx.doi.org/10.6036/8058
12. Ventes, C.C., Navarro-Newball, A.A., Velasco, D.A, Prakash, E.C. GSTF Journal on Computing (JoC) 4(1), 23-32 (2014). A Programming Library for Creating Tangible User Interfaces. ISSN: 2251-3043.
13. Tian, Y., Guan, T., Wang, C. Sensors, 10(4), 28852900 (2010). Real-time occlusion handling in augmented reality based on an object tracking approach.
14. Boberg, M., Piippo, P., Ollila, E. 2008. Designing avatars. In: Proceedings of the 3rd in-ternational conference on Digital Interactive Media in Entertainment and Arts (DIMEA '08). pp. 232-239, ACM, New York, NY, USA (2008). DOI=http://dx.doi.org/10.1145/1413634.1413679
15. Neumann, U., You, S. Multimedia, IEEE Transactions on, 1(1), 53 64, (1999). Natural feature tracking for augmented reality . doi: 10.1109/6046.748171.
16. Lee, T., Hollerer, T, Handy AR: Markerless Inspection of Augmented Reality Objects Using Fingertip Tracking. In: Wearable Computers, 2007 11th IEEE International Sympo-sium on. pp.83-90 , IEEE (2007). doi: 10.1109/ISWC.2007.4373785.
17. Schall, G., Grabner, H., Grabner, M., Wohlhart, P., Schmal-stieg, D., Bischof, H. 3D tracking in unknown environments using on-line keypoint learning for mobile augmented reality. In: Computer Vision and Pattern Recognition Workshops, 2008. CVPRW '08. IEEE Computer Society Conference on. pp.1-8, IEEE (2008). doi: 10.1109/CVPRW.2008.4563134.

18. Hinterstoisser, S., Lepetit, V., Ilic, S., Holzer, S., Bradski, G., Konolige, K., Navab, N.. Model Based Training, Detection and Pose Estimation of Texture-less 3D Objects in Heavily Cluttered Scenes. In: Proceedings of the 11th Asian Conference on Computer Vision - Volume Part I, ACCV12. pp. 548562, Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag (2013).
19. Pensyl, W.R., Jernigan, D.K.,Qui, T.C.T., Fang, H.P, Ping, L.S.. Large area robust hybrid tracking with life-size avatar in mixed reality environment: for cultural and historical installation. In: Proceedings of The 7th ACM SIGGRAPH International Conference on Virtual-Reality Continuum and Its Applications in Industry (VRCAI '08). Article 9 , 5 pages, ACM, New York, NY, USA (2008). DOI=http://dx.doi.org/10.1145/1477862.1477874
20. Nagendran, A., Pillat, R., Hughes, C., Welch, G. Continuum of virtual-human space: towards improved interaction strategies for physical-virtual avatars. In: Proceedings of the 11th ACM SIGGRAPH International Conference on Virtual-Reality Continuum and its Applications in Industry (VRCAI '12). pp. 135-142ACM, New York, NY, USA (2012). DOI=http://dx.doi.org/10.1145/2407516.2407554.
21. Weil, P., de la Peña, N. Avatar mediated cinema. In: Proceedings of the 2008 International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology (ACE '08). pp. 209-212.ACM, New York, NY, USA (2008). DOI=http://dx.doi.org/10.1145/1501750.1501799.
22. Mu, B., Yang, Y., Zhang, J. Implementation of the Interactive Gestures of Virtual Avatar Based on a Multi-user Virtual Learning Environment. In: Information Technology and Computer Science, International Conference on. pp. 613-617, 2009 International Conference on Information Technology and Computer Science, (2009)
23. Roussou, M., Trahanias, P., Giannoulis, G., Kamarinos, G., Argyros, A., Tsakiris, D., Georgiadis, P., Burgard, W., Haehnel, D., Cremers, A., Schulz, D., Moors, M., Spirtounias, E., Marianthi, M., Savvaides, V., Reitelman, A., Konstantios, D., Katselaki, A. Experiences from the use of a robotic avatar in a museum setting. In: Proceedings of the 2001 conference on Virtual reality, archeology, and cultural heritage (VAST '01). pp.153-160, ACM, New York, NY, USA (2001)
24. The Editors of Encyclopaedia Brittaninca. Tlingit, http://global.britannica.com/topic/Tlingit, last accesed 2018/6/1
25. Isukapalli, R., Elgammal, A., Greiner, R. Learning to detect objects of many classes using binary classiers. In: Proceedings of the 9th European Conference on Computer Vision - Volume Part I, ECCV06. pp. 352364, Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag (2006)
26. Viola, P., Jones, M. Rapid object detection using a boosted cascade of simple features. In: Computer Vision and Pattern Recognition, 2001. CVPR 2001. Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on. pp. I 511I518 vol. 1. IEEE (2001)
27. Jain, A.K, Duin, R.P.W, Mao, J. IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. In-tell., 22(1), 437 (2000). Statistical pattern recognition: A review.
28. Provost, F., Kohavi, R. Mach. Learn., 30(2-3), 127132 (1998).On applied research in machine learning.
29. Schell. J., The Art of Game Design: A Book of Lenses, Second Edition. Publisher: A K Pe-ters/CRC Press; 2 edition (2014). ISBN-10: 1466598646. ISBN-13: 978-1466598645.
30. Project Kinect for Azure. https://azure.microsoft.com/en-us/campaigns/kinect/, last visited 2018/6/9

MUSA – I. When the bus is the thing to connect to Internet.

Víctor Manuel Padrón Nápoles[1], Manuel de Buenaga Rodríguez[2], Diego Gachet Páez[2]*, José Luis Esteban Penelas[3], Alba Gutiérrez García-Ochoa[1], Alfonso López Pérez[1] and Fernando Aparicio Galisteo[2]

[1] Ingeniería Industrial y Aeroespacial. Universidad Europea de Madrid. C/ Tajo s/n. Villaviciosa de Odón. 28670 Madrid. Spain
[2] Ciencias y Tecnología de la Información y las Comunicaciones. Universidad Europea de Madrid. C/ Tajo s/n. Villaviciosa de Odón. 28670 Madrid. Spain
[3] Diseño, Arquitectura y Construcciones Civiles. Universidad Europea de Madrid. C/ Tajo s/n. Villaviciosa de Odón. 28670 Madrid. Spain
diego.gachet@universidadeuropea.es

Abstract. Urban mobility optimization problem is a key factor to reduce the energy consumption and to provide a healthier life in the context of Smart cities. This optimization requires the appropriate sensorization of transport infrastructure and means. The success of social innovations and the application of Big Data and Artificial Intelligence techniques and algorithms rely on the availability of fast, complete and reliable data. In the case of buses, these data are provided from Automatic Fare Collection (AFC), Automatic Passengers' Counting (APC) sensors and mobile devices data. The use of APC is crucial to determine, in real time, occupancy of buses and passengers' flow related to a given bus in each stop. This information can be used for a demand based dynamic planning of the buses to optimize bus transport and reduce pollution. This paper describes the work of a bus sensorization using APC in city of Madrid as part of MUSA-I project, a long-term project oriented to the development of smart bus stops and an inclusive, social driven transport system.

Keywords: Smart Cities, bus sensorization, smart bus stops

1 Introduction

The architecture and the city are nowadays changing at a vertiginous speed with respect to the way it has been understood, in almost the past two thousand years. It is mutating into a new paradigm that provides traditional architecture with new methodologies, technologies and materials, which make possible to build Smart Cities and ensure that these new cities are highly sustainable (Zero Net Energy ideal) and very

healthy for their inhabitants (Healthy Cities). This new paradigm is addressed from territorial to human scale, proposing an advanced evolution in urban thinking. These new cities based on modern technologies will be real-time adaptable, mutating towards other configurations that fit new territorial and global conditions [1].

Smart Cities sustainability is related to the ideal of Zero Net Energy i.e. being energetically self-sufficient using renewables energies. In this sense, the use of smart transport system using non-conventional propulsion (electric and alternative energies) should help to reduce, by 2050, Greenhouse gas emissions in a 60% with respect to levels of 1990 [2].

There are five main core concepts for developing urban and metropolitan spaces in a society where citizens have a highly awareness of the environment:

1. Future advanced transport systems (as a tool to produce a tangible future)
2. Environments and ecology (as constitutive parts of the future)
3. Enjoyment (as a productive tool orientated towards sustainability)
4. Zero Net Energy and Health (Smart Cities aim to become a 100% healthy city)
5. Citizen's participation. Smart Cities will count on citizen's real-time participation

It is necessary to explore and develops new models to live in Smart Cities at four scales: Human, Residential, Urban and Territorial, and a key factor for it is the use of an advanced sustainable (Zero Energy ideal) transport system. In our era of changing demographics and Supermodernity, diminishing resources and climate change, new living models are needed.

It is very important that these models promote technological applications and services that provide citizens with an increasing level of personalized and timely information about transport system allowing a faster travel process and increasing quality of life of citizens.

No forgetting, inclusiveness, the need to ensure that all members of society; elderly, people with low-income, disabled, migrants; can benefit from a smart, digital and inclusive transport system.

Specially in the case of the elderly, mobility should be addressed not only for transportation, but also as an element to promote a healthier life fostering walking and physical exercise in general. In a society, with a rapidly aging population, there is a high risk of cognitive impairment, fragility and multiple chronic health conditions. All this has significant negative consequences for their independence, quality of life and, also, for the sustainability of health and care systems.

2 The Transport System

Urban mobility optimization problem has a great focus in the context of Smart cities. To its solution at least four factors can be highlighted: a) transport demand, b) transport system state, c) transport management and d) disruptive procedures and technologies that can improve the actual transport system.

Figure 1 describes the concept of the transportation system used in this paper. In the center, the state of the transport system (the state of vehicles, trains, roads, rail-

ways, etc.) is used to plan the demand of transport for users (passengers and private drivers) and for authorities to manage the state of transport (traffic lights signaling, cameras, sensors and actuators). On the other hand, a set of transport providers is interacting with the system: bicycles, trains, metro, buses, tram, taxis, pedestrians and advanced providers as: shared transport, collaborative transport, on-demand transport, autonomous vehicles, etc.

This concept is modelled to replicate physical transport system operation and study alternative (what-if) scenarios.

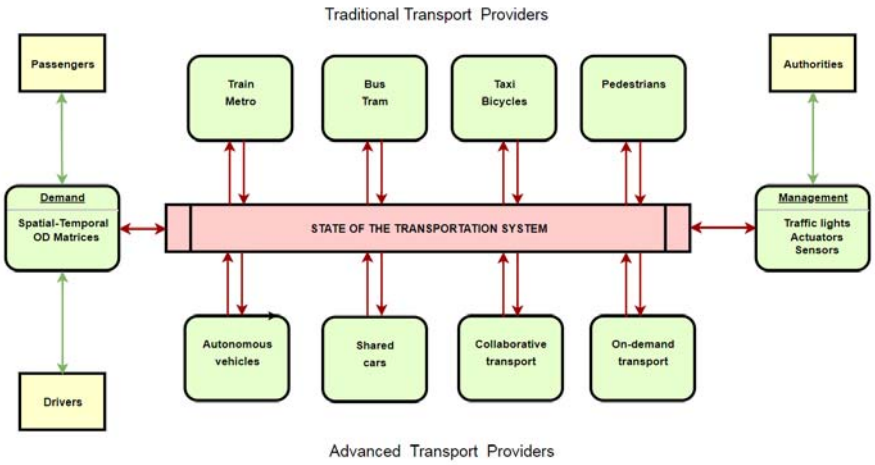


Fig. 1. General concept of the transport system used in this paper.

To model the demand individual trips are inferred, which can be mined using Big Data techniques from these data sources:

1. Smart Card Automatic Fare Control (SC-AFC) data
2. Smart phone and embedded GPS data
3. Points of Interests (POI) information
4. Census and Survey
5. Land use information

Smart Card Automatic Fare Control (SC-AFC) data jointly with mobile phone and embedded GPS data are the main source of information for mining individual trips.

Smart Cards are widely used in public transport networks and provide information about boarding time and station, vehicle identification (mainly buses and trams) and alighting time and stations (mainly for trains). In some cities as Singapore and Amsterdam, the transport charge is based on total distance for train and buses, so passengers use their cards at entry and exit point of public transport system. In these cases, more information can be obtained than in cities like London or Madrid, which use a flat rate (card is not always used at exit point).

There are many algorithms and techniques for mining SC-AFC data and reconstructing trips [4], travel modes [5], [6], [7] activity identification [8], [9] and agent-based transport models and simulation as Bouman [11] for Amsterdam and Rotterdam and Fourie, Erath, Ordóñez Medina, Chakirov and Axhausen [3] for Singapore's public transport.

Smart phone and embedded GPS data provides information about individual trips, which is mined from the data produced by two main types of events: network-triggered location updates (i.e. during a handover, when during a call the phone move between two different cells) and event-triggered updates (i.e. when a call is received or placed). Some applications use these two main events for data mining while other use CDR or Call Detail Record (the data used in telecom companies for billing purposes).

There are many algorithms and techniques for mining mobile phone data and discover OD data and activities ([3], [12], [13]), for discovering places related to general activities as home, work, leisure, shopping, etc. [14], for discovering transport modes [15] and for modelling San Francisco Bay Area mobility applying agent-based simulation in MATSim based on anonymized CDR records [16].

Points of Interests (POI) information allows to infer other activities beyond primary locations (home, work, study). Noulas and Mascolo [17] infer other activities (Arts, Entertainment, Shops, Food, Work, etc.) using CDRs and Foursquare data. Similarly, Phithakkitnukoon, Horanont, Di Lorenzo, Shibasaki and Ratti [18] infer activities using POIs extracted from Yahoo maps.

Census and Surveys provide information about demography, health, communication and transport, etc., which are used to validate home and working areas, city hotspots, traffic flows and validate land use. These data have a good spatial resolution but are updated usually in intervals of several years.

Land Use datasets provide information that characterize an area of the city based on its planned and effective land use and can be used to validate activities mined from SC-AFC and mobile phone data.

2.1 State of the Transport System

Transport systems and the related traffic flow are key components for a Smart city, in fact it has a major role in the economic development of a city or region. Nowadays, the growing volume of traffic, especially the private traffic, produce serious congestion problems that deteriorate the quality of life of the travelers and citizens, cause environmental pollution problems and increase the risk of traffic accidents. To overcome these problems, there are two basic approaches: increase the road capacity or decrease the traffic demand. None of those two approaches alone will solve the problem, instead, new technologies can be used to improve the traffic flow in cities, and a better public transportation service can be provided to make more travelers choose public transportation, reducing the pollutions levels and improve the citizen's mobility.

For modelling the traffic flow several approaches has been used, for example traffic assignment models as discussed in [19], where network models are used to allo-

cate traffic loads to routes. These models are static and then it is not possible to make vehicle movements explicit; in fact, only load capacities are modelled, while the current transportation performance is not considered. Other interesting approach is the application of Max-Plus algebra to transportation systems as described in [19], the focus is on synchronization of vehicle's arrivals and departures at local points in the network. The dynamics induced by passenger movements are not included in this approach. At the other hand, Petri nets style models also are used to model traffic as for example in [20].

High-quality information systems both on vehicles, as public buses, and in road infrastructure are also important for better citizen's mobility. The increased communication, between the vehicles and the infrastructure, and between vehicles, offer opportunities for flexible and innovative traffic solutions. On the other hand, the more there is automation in the vehicles, the more they can provide accurate sensing measurements that could also be used for a better traffic control.

There are several visions of vehicular communications, generally called Vehicle-to-2 (V2X) systems, including vehicle-to-vehicle (V2V), vehicle-to-infrastructure (V2I), vehicle-to-cloud, (V2Cloud) and internet of vehicles (IoV). A common term to describe the systems where vehicles communicate with the infrastructure and each other is cooperative systems or cooperative Intelligent Transport System (C-ITS). In the past few decades, there has been growing interest in getting vehicles as active participants in the traffic control and information sharing as is extensively described in [21]. Now, in the era of Smart Cities, the urban buses have a major role in the quality of life of the citizens. In general, they are equipped with at least Global Positioning System (GPS) equipment, so their location can be tracked in real time, but it is important to gathering more data about the passengers and their travel routines for a better understanding of urban mobility. In this sense, next generation public buses need more sensors, as for example smart ticketing including biometric recognition, destination selection, counting passengers that drop off, tracking the number of passengers of the bus in real time, mobile phone chargers and information devices.

This vehicle information also need to be coordinated with Bus stops. There are several efforts in this sense, for example Barcelona's smart bus stops are connected to the city's fiber-optic backbone network. They display online bus running schedule, information for foreign visitors, shows advertising and important events, USB charging points for mobile gadgets, such as smart phones, laptop, ipod, tablets, while provide free Wi-Fi hotspots, giving waiting people access to the Internet using their mobile devices [22].

Indicators of common use, such as passenger count, travel speed, time of transport of passengers, locations of and the measurement of time, are being increasingly completed with other more sophisticated measures, such as real-time levels of occupation of the means of transport or the adequacy of the trip to the user's needs [23]. In this context, there has been a growing interest in the development of tools based on analysis of additional data, such as social media (providing access to valuable information), incident detection, mobility and activity patterns complemented with analysis of opinions of the users [24]. The integration of different sources of information also plays a key role for multimodal public transport, which reduces the complexity of public

transport networks while considering all the different modes of transport (e.g. metro, bus, cycling, walking or car sharing) [25].

3 MUSA – I Project.

A pilot project, codenamed MUSA (Advanced Sustainable Urban Furniture – "Mobiliario Urbano Sostenible y Avanzado") is being developed to start applying these ideas to buses in Madrid city sponsored by Universidad Europea de Madrid and Municipal Transport Company (EMT) of Madrid.

To increase the effectiveness of this approach, in addition to a software application, two complementary systems are being designed: a) increased sensorization of buses installing Automatic Passenger Counters (APC) to know the occupancy of the bus in real time, the availability of free places for wheelchairs and baby-strollers and the flow of passengers in each bus stop and b) the design of smart bus stops, which are a very special Point of Interest (POI), is analyzed from social, architectural and technological points of view. Research about possible smart stop services are being performed. This can include not only public and private transport services, but community communication services, publicity services, environment and health services, etc. Figure 2 shows the MUSA – I architecture.

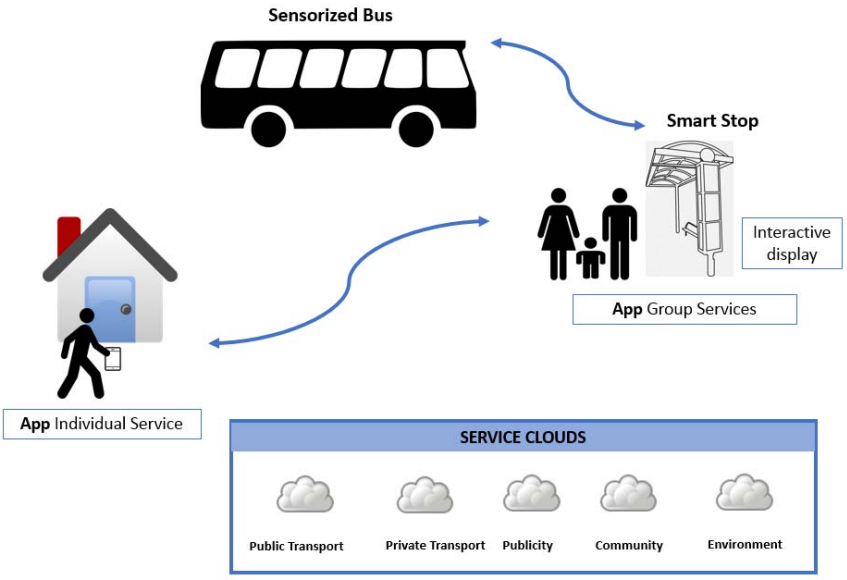


Fig. 2. Main components of MUSA – I architecture.

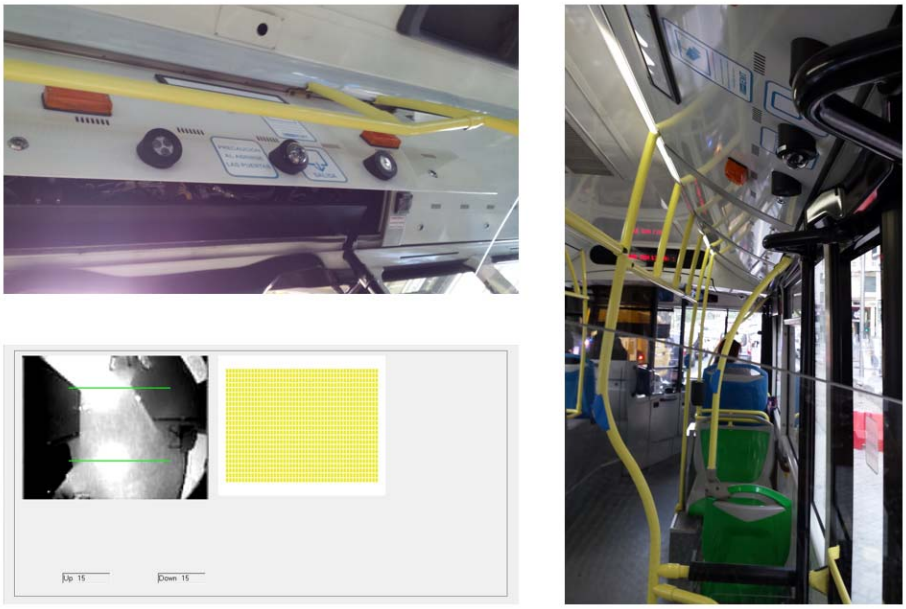


Fig. 3. Installing and testing APC based on video cameras

Madrid buses are already sensorized with ALV (Automatic Vehicle Location) using GPS and SC-AFC (Smart Card Automatic Fare), the next level of sensorization planned by EMT is the use of APC or Automatic Passenger Counters. There are different technologies for APC, being the most used infrared systems and vision system (video cameras, stereo cameras and Time-Of-Flight cameras). Though for this project, infrared systems and stereo cameras were studied, we used simple video cameras from Retail Sensing, a Manchester company, to evaluate their performance in real-life conditions (Figure 3). The cameras located on top of front and rear door use artificial vision algorithms to count in and out passengers. This information is sent through a 4G router to an MQTT server to make it globally available.

First, we tested them on Lab, then we installed then on buses and currently we are finishing the testing during daily operation of a bus in the center of Madrid (Figure 3).

The smart bus stop is being designed as a smart furniture, which provides different services: information about public and private transport, reservation of trips, as well as publicity services, community communication services, environment awareness information and delivering point for e-commerce. These services can be accessed from a screen available in the stop which will connect passengers to a set of cloud services (Figure 2). The works on smart stop are currently in progress.

The software application will be available in two versions, as an individual service in passengers' mobile phones and as a group service on smart stops screens. The application allows the multi-modal planning of trips including walking, cycling, taxis and public transport (Figures 4 and 5). It is running on Google Maps and it is customized for individual users.

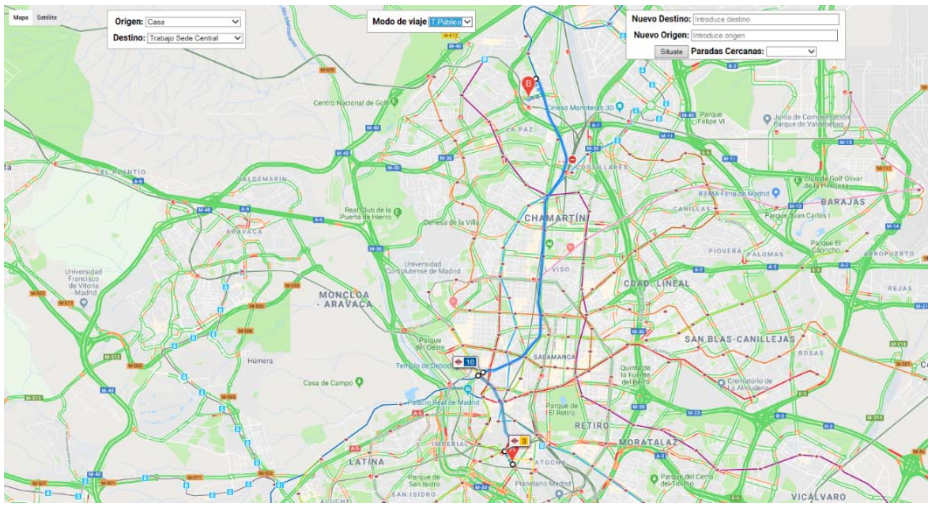


Fig. 4. Planning a trip using public transport

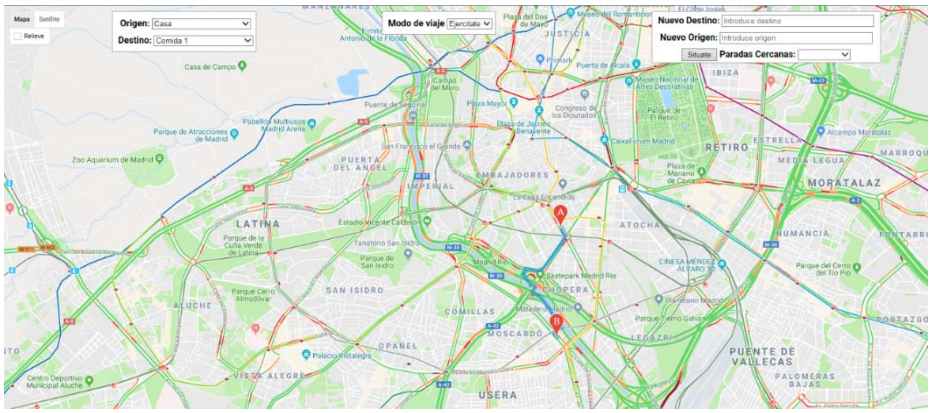


Fig. 5. Planning a walking trip for a healthier life

4 Preliminary results

The APC system is currently being tested and adjusted on a bus in the center of Madrid. A web app allows to visualize the number of daily passengers using the bus (Figure 6), as well as the behavior of passenger flow in each stop (Figure 7). These data is important not only for planning trips from users' point of view, but also for resources optimization of the company operating the buses. For example, if a bus route have a higher demand on a specific part of the route, not on the whole route,

during a interval of time, so route could be dynamically configured to fulfill this demand and save resources.



Fig. 6. Number of daily passengers entering in the bus

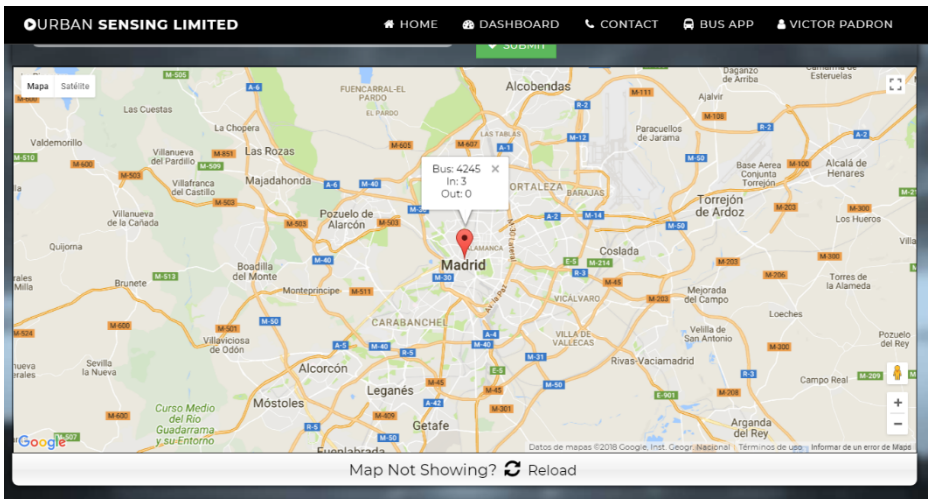


Fig. 7. Behavior of passengers' flow on one bus stop

The works on the development of the smart stop are currently in progress, while the development of the app continues on the planned schedule.

5 Conclusions

This paper describes the first steps of a novel, long-term, system that combines new technologies and social involvement for optimizing mobility resources. This step focused on buses is currently in development. The complete sensorization of buses in Madrid is already an official plan of Municipal Transport Company, so it is foreseeable that these data can be soon available through Open Data databases of the company. This will ensure a more efficient planning and future reserve of trips using Transport Demand Management techniques. We also hope that development of Smart Bus Stops converts them into a very important spot from the transport planning view as well as from citizen life point of view.

Author Contributions: Conceptualization and Methodology, Padrón, Buenaga, Gachet, Penelas and Aparicio; Software, Gutiérrez García-Ochoa, López and Padrón; Investigation and Validation, Buenaga, Gachet, Penelas, Padrón, Gutiérrez García-Ochoa and López.

Funding: This research was funded by Universidad Europea de Madrid grant number 2017/UEM22

Acknowledgments: We want to express our deep gratitude to all those persons and institutions that are helping and supporting us in the realization of this project. We want to thank the institutional support from “Universidad Europea de Madrid”, from the Municipal Transport Company (EMT) of Madrid, for the kindly support of its executives and technical staff; and at last, but not at least, to Asad Syed from Retail Sensing for his kindly support and sponsorship with the APC system. To all of you, thank you very much.

References

1. T. Verebes, Master Planning The Adpative City, London and New York: outledge Taylor & Francis Group, 2014.
2. Comisión Europea, *Libro Blanco del transporte: Hoja de ruta hacia un espacio único europeo de transporte: por una política de transportes competitiva y sostenible*, Luexemburgo: Oficina de Publicaciones de la Unión Europea, 2011. 28 p. 978-92-79-18274-7.
3. P. J. Fourie, A. Erath, S. A. Ordóñez Medina, A. Chakirov and K. W. Axhausen, "Using smartcard data for agent-based transport simulation: the case of Singapore," 2016.
4. K. G. Goulias, C. R. Bhat, R. M. Pendyala, Y. Chen, R. Paleti, K. C. Konduri, T. Lei, D. Tang, S. Y. Youn, G. Huang and others, "Simulator of activities, greenhouse emissions, networks, and travel (SimAGENT) in Southern California," in 91st annual meeting of the Transportation Research Board, Washington, DC, 2012.
5. A. Horni, K. Nagel and K. Axhausen, "The Multi-Agent Transport Simulation MATSim," Ubiquity Press, 2016.
6. M. Trépanier, N. Tranchant and R. Chapleau, "Individual Trip Destination Estimation in a Transit Smart Card Automated Fare Collection System," Journal of Intelligent Transportation Systems, vol. 11, 2007.

7. M. A. Munizaga and C. Palma, "Estimation of a disaggregate multimodal public transport Origin–Destination matrix from passive smartcard data from Santiago, Chile," Transportation Research Part C: Emerging Technologies, vol. 24, 2012.
8. N. J. Yuan, Y. Wang, F. Zhang, X. Xie and G. Sun, "Reconstructing Individual Mobility from Smart Card Transactions: A Space Alignment Approach," in IEEE 13th International Conference on Data Mining (ICDM), 2013.
9. F. Devillaine, M. Munizaga and M. Trépanier, "Detection of Activities of Public Transport Users by Analyzing Smart Card Data," Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, vol. 2276, 2012.
10. S. Isaacman, R. Becker, R. Cáceres, S. Kobourov,, M. M. Martonosi, J. Rowland and A. Varshavsky, "Identifying Important Places in People's Lives from Cellular Network Data," Pervasive Computing, vol. 6696, 2011.
11. P. Bouman, "Recognizing demand patterns from smart card data for agent-based micro-simulation of public transport," in Ph.D. Thesis, Department of Decision and Information Sciences, Erasmus University Rotterdam, The Netherlands, 2012.
12. L. Alexander, S. Jiang and M. Murga , "Origin–destination trips by purpose and time of day inferred from mobile phone data," Transportation Research Part C: Emerging Technologies, vol. 58, 2015.
13. S. Jiang, J. Ferreira Jr. and M. C. González, "Activity-Based Human Mobility Patterns Inferred from Mobile Phone Data: A Case Study of Singapore," in Int. Workshop on Urban Computing, 2015.
14. Y. Yang, P. Widhalm, S. Athavale and M. C. González, "Mobility Sequence Extraction and Labeling Using Sparse Cell Phone Data," 2015.
15. H. Wang, H, F. Calabrese, G. D. Lorenzo and C. Ratti, "Transportation mode inference from anonymized and aggregated mobile phone call detail records," in 13th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, 2010.
16. A. Pozdnoukhov, "Activity Based Travel Demand Modelling with Cellular Data," 2015. [Online]. Available: http://www.ucconnect.berkeley.edu/workforce-development/ uc-connect-transportation-planning-workshops/role-big-data- transportation.
17. A. Noulas and C. Mascolo, "Exploiting foursquare and cellular data to infer user activity in urban environments," in Mobile Data Management (MDM), 2013.
18. S. Phithakkitnukoon, T. Horanont , G. Di Lorenzo, R. Shibasaki and C. Ratti, "Activity-aware map: Identifying human daily activity pattern using mobile phone data," Human Behavior Understanding, 2010.
19. Q. Fu, R. Liu and S. A. Hess, "A review on transit assignment modelling approaches to congested networks: A new perspective," Procedia - Social and Behavioral Sciences, 2012.
20. H. Stefan Haar and T. Simon, "A Hybrid-Dynamical Model for Passenger-flow in Transportation Systems," IFAC-PapersOnLine, vol. 48, 2015.
21. B. Krishnamachari, "Vehicular sensing, communication, and green transportation," 2015. [Online]. Available: http://imsc.usc.edu/retreat2015/presentations/slides_Bashkar.pdf.
22. P. Wallbank, "A geek's tour of barcelona," 2013.
23. S. Ram, Y. Wang, F. Currim, . F. Dong, E. Dantas and L. A. Sabóia, "SMARTBUS: A web application for smart urban mobility and transportation," in 25th International Conference Companion on World Wide Web, 2016.
24. A. Nikolaidou and P. Papaioannou, "Utilizing Social Media in Transport Planning and Public Transit Quality: Survey of Literature," Journal of Transportation Engineering, 2018.
25. J. Dibbelt, C. Konstantopoulos,, D. Wagner, D. Gavalas, S. Kontogiannis, C. Zaroliagis, ... and G. Pantziou, "Multimodal route and tour planning in urban environments," Computers and Communications, 2017.

Optimization of V2V communications using Voronoi diagrams in smart cities

Roberto Casado-Vara[1], Alfonso González-Briones[1], Fernando De la Prieta[1], Javier Prieto[1], and Juan M. Corchado[1]

BISITE Digital Innovation Hub,
University of Salamanca.
Edificio Multiusos I+D+i, 37007, Salamanca, Spain.
{rober, alfonsogb, fer, javierp, corchado}@usal.es,
WWW home page: https://bisite.usal.es/en

Abstract. Vehicle-to-vehicle (V2V) communications open up new possibilities for traffic control as it has a high precision and can detect and avoid traffic jams in real time. This paper presents a new V2V communications model based on Voronoi diagrams and stores the information in a distributed database with high availability. Voronoi diagrams are used to divide the map of a smart city into regions that provide the basis for the new V2V communications model. The novelty of this V2V communications system is to use Voronoi diagrams to regionalize V2V communications, and these divisions also provide an edge computing layer to process data and store them in the distributed database.

Keywords: V2V communication, Traffic congestion, Voronoi diagrams, edge computing.

1 Introduction

The increase of traffic in cities results in an increase in the number of traffic jams and accidents. Accidents, in turn, contribute to more severe traffic jams. The communications between vehicles are composed of V2V (vehicle-to-vehicle communications) and vehicle-to-infrastructure communications (V2I). These communications allow to increase the efficiency of traffic management [1]. In recent years, V2V and V2I communications (also heterogeneous vehicular communication) have made great progress and have achieved the standardization of the IEEE 802.11p norm [2] [3]. Through V2V and V2I communications, real-time traffic and accident information can be collected and processed by central servers with high computing capacity. Although smart transport systems based on cameras, roadside sensors and sensor networks can be effective in solving traffic management problems, these systems require a very high economic investment. The problem with these systems is that they can only monitor traffic where the sensors are placed. However, vehicles with wireless communication capabilities can collect traffic status information on any stretch of road using V2V communications. The advantage of using V2V communications is that it has a high

capacity for response and real-time processing, especially in urban areas. Being able to detect traffic jams through V2V communications is one of the biggest concerns of drivers. Many of the systems that manage traffic can collect the situation of traffic, but their accuracy and real-time performance in detecting traffic jams in urban areas is not as good as V2V communications. For all these reasons, the reduction of traffic jams through V2V communications is an emerging trend.

A large number of researchers have studied important features of the V2V networks, including high mobility within the road structure, changes in network topology [4] and large-scale partitioned networks [5]. The vast majority of their work assumes that all vehicles have the ability to communicate wirelessly. This assumption is a compulsory prerequisite for carrying out research on the V2V network. In V2V communication, the carry-and-forward strategy is used widely and has been proved effective [6]. This strategy can reduce packet loss. It should be considered that many of the traffic jams occur in cities' street junctions. Therefore, in this work we propose to place smart poles near the intersections as generating points and thus divide the city into regions using Voronoi diagrams. Voronoi diagrams are often used to partition areas. To achieve the effective placement of road-side units, Patil and Gokhale [7] proposed a novel Voronoi diagram-based algorithm using packet delay and loss as a criteria. However, not all existing V2V networks are based on partitions based on Voronoi diagrams. In this paper we propose to use the Voronoi regions to have regions of influence for V2V communications. That is, vehicles within the Voronoi region of a smart pole will send their information to these smart poles. Then, the smart poles will send the information of the vehicles in their region of Voronoi to be processed.

Motivated by the ideas described above, this work proposes a system to process information effectively to avoid bottlenecks. The main contributions and novelties of this work are as follows: 1) It presents a new V2V communication model based on Voronoi regions which distribute the collection of data and the sending of information among the smart poles and the cars. These smart poles will send data to the central processing nodes. Since at road intersections bottlenecks are common, smart poles are placed near several of them and are used as generating points for constructing the Voronoi diagram. 2) The traffic information will be stored in a distributed data system specialized in the management of large volumes of data, HDFS (Hadoop distributed file system). The novelty of this system lies in that information is stored in encrypted form, which greatly reduces the time required to search the data in the database. In this way, traffic jam control algorithms have high availability to information.

This work is organized as follows: Section 2 reviews the existing literature on V2V communications and traffic monitoring which pursues to prevent traffic jams from occurring. The model for gathering information via edge computing with Voronoi regions is described in section 3. In section 4 experimental results on the improvements for gathering data with Voronoi regions and the search for

HDFS encrypted information are presented. Section 5 presents the conclusions drawn from this work.

2 Related Work

Regarding V2V communication there are a range of position-based protocols, based on topology, geolocation, cluster-based, multicast-based and broadcast-based routing protocols [8]. The critical challenge for these protocols is to transmit information with a low delay in time and a low packet loss rate, taking into account the high mobility of vehicles and changes in terrain topologies. To decrease transmission delay of time-critical emergency messages, Suthaputchakun et al. [9] presented trinary partitioned black-burst-based broadcast protocol. To further decrease packet loss, Ghafoor et al. [10] proposed an improved geographical routing protocol that put link quality and stability as metrics for the next hop selection. In spite of the efforts of scholars to overcome these challenges, in practice some factors still affect the performance of V2V communication. Liu et al. [11] analyzed the influence of regular and irregular terrains through the proposed path loss models. Baccelli et al. [12] made a comprehensive analysis of the information propagation speed under different vehicle densities on roads or highways. Soufiene et al. [13] presented a review of technologies for monitoring urban traffic. This survey has shown that these technologies do not have precision in real-time measurement and transmission. The use of new equipment to overcome these deficiencies is not ideal due to the limitations of the high cost of these technologies. V2V communication knows that traffic jams are a new trend for traffic monitoring [14]. Vaqar and Basir [15] used a node to gather the traffic information as a snapshot of the current traffic condition, and they analyzed it by using pattern recognition techniques. Toutouh et al. [16] [17] proposed the application of specific optimization methods to improve or to create new V2V and V2I communication protocols.

Although V2V communication-based technologies have been used in the literature to deal with traffic jams, gather and spread of information is still not well understood. To the best of our knowledge, using Voronoi regions and encrypting information in HDFS is going to be a major breakthrough in the real society. Therefore, in this paper we propose an algorithm for the distributed gathering of traffic information using Voroni regions. This allows several nodes and not just the central node, to receive information. This allows for load balancing of traffic information via edge computing. Then, the traffic information is stored encrypted in HDFS, this allows to search for the information much faster than if the information is not encrypted.

3 V2V communication model based on Voronoi diagram

3.1 Voronoi diagrams

There are many different reasons for traffic jams. In general, traffic jams are usually caused by intersections, accidents, construction sites, etc. Thus, in this work, we are going to use static smart poles spread throughout the city covering as many intersections as possible. These smart poles will be the generating points to divide the region using Voronoi diagrams. These divisions will provide the basis for the new V2V communications model proposed in this paper.

Through the selection of a city map and the placement of smart poles to transmit the information via wifi to the central nodes, the generating points for the Voronoi regions are provided. These intersections on the map are selected as a finite group of points $P = \{p_1, \cdots, p_n\}$ (also called generating points) in the Euclidean plane of the city map. This technique of dividing maps into regions of Voronoi can be used in many types of maps. The pi points corresponding to the smart poles and the boundary lines are called Voronoi cells. The Voronoi cell associated with p_i can be expressed as SH_i, where the distance from each point to p_i is less than or equal to the distance to any other p_j $(j \neq i)$. Let M be a set of all points in the map. If $d(m, p_i)$ denotes the distance between the point $m \in M$ and p_i, then $SH_i = \{m \in M | d(m, p_i) \leq d(m, p_j)$ for all $j \neq i\}$. This partition based on the Voronoi regions can be used to add a new layer to a map. In addition, it is assumed that the vehicles have the ability to send information and positioning. It is easy to determine which Voronoi cell each vehicle is in based on its position information.

3.2 V2V communication model via edge computing

V2V communication allows vehicles to travel through smart cities with a reduced risk of traffic congestion. These communications between the vehicles are made directly between the vehicles. In Fig. 1, V2V communications are made only between the vehicles that are in the same region of Voronoi and those that are close to the edges of the Voronoi regions. In this way, the sending of information between the vehicles is reduced and, therefore, the communication networks are not saturated with messages. In addition, the information created in V2V communications within each of the Voronoi regions is processed in each of the smart poles. This information is finally sent to HDFS where it is stored encrypted. This saves a record of all V2V communications created within the smart city. With this data city authorities can make predictive studies of traffic congestion. Moreover, police can audit traffic accidents to help clarify them unequivocally. Since the information stored in HDFS is encrypted, the search engines find it very quickly, and to access it you only have to decrypt it.

The current V2V communications send the information about the speed, time and position of each vehicle to all other vehicles within range. This is done by sending $m = n(n-1)$ messages (i.e., messages sent by the vehicle and replies

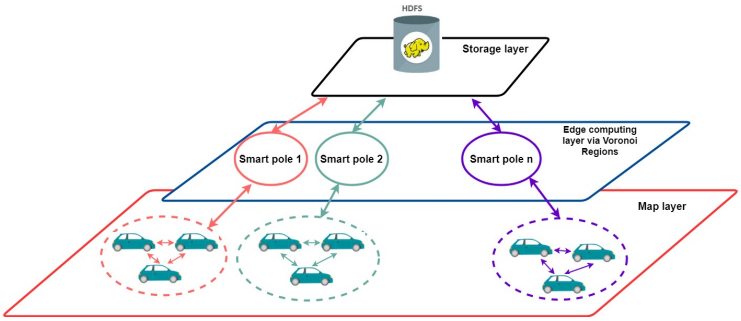


Fig. 1. All different colors show the regions of Voronoi that are created on the map. Furthermore, one can see the edge computing layer to process data and store it in HDFS.

received by broadcast). However, using the Voronoi diagrams to divide the map into Voronoi regions, and assuming that each car within that region only communicates with vehicles in the same region the number of messages sent is given by the equation below:

$$m_V = \sum_i n_i(n_i - 1) \tag{1}$$

where m is the number of messages sent and i is the number of regions of Voronoi.

Theorem 1. *Let m bet the messages sent by V2V communications and let m_V be the messages sent by V2V communications via Voronoi regions. Then $m > m_V$.*

Proof. Let $n = n_1 \cup \cdots \cup n_i$ be a disjoint decomposition of the Voronoi regions and let i be the number of these Voronoi regions. Since the V2V communications model needs n(n-1) messages to send the information and receive confirmation in the same region, if we use n decomposition we have:

$$\begin{aligned} n(n-1) =& (n_1 + \cdots + n_i)((n_1 + \cdots + n_i) - 1) \\ &= (n_1 + \cdots + n_i)^2 - (n_1 + \cdots + n_i) \\ &= (\sum_i n_i)^2 - \sum_i n_i > \sum_i n_i^2 - \sum_i n_i \\ &= (\sum_i n_i)^2 - \sum_i n_i = \sum_i n_i(n_i - 1) = m_V \end{aligned} \tag{2}$$

Therefore, it is demonstrated that the V2V communications model with Voronoi regions always needs fewer messages to make communications successful.

One of the problems is when vehicles change the region of Voronoi in their movement. This affects V2V communications as the vehicle has to communicate with a different group of vehicles. To solve this problem, we propose a way for

the vehicle to run an algorithm to predict which are the closest Voronoi regions it can enter.

Theorem 2. *Let $S = P \cup Q$ be a disjoint decomposition of the point set S, and let $p_0 \in P$ and $q_0 \in Q$ be such that*

$$d(p_0, q_0) = \ min\ d(p, q)\ where\ p \in P\ and\ q \in Q \tag{3}$$

Then the Voronoi regions of p_0 and q_0 are edge-adjacent in V(S) (i.e., Voronoi region of S).

Proof. Otherwise, the line segment $\overline{p_0, q_0}$ contains a point z that belongs to the closure of some Voronoi region VR(r,S), where $r \neq p_0, q_0$. Let us assume that r belongs to Q; the case $r \in P$ is symmetric. From $z \in \overline{VR(r, S)}$ follows $d(z, r) \leq (q_0, r)$, hence

$$\begin{aligned} d(p_0, r) &\leq d(p_0, z) + d(z, r) \\ &\leq d(p_0, z) + d(z, q_0) \\ &= d(p_o, q_0) \leq d(p_0, r) \end{aligned} \tag{4}$$

by minimality of $d(p_0, q_0)$. Hence, equality must hold, and we obtain $d(p_0, r) = d(p_0, q_0)$ and $d(z, r) = d(z, q_0)$.
But since p_0 lies on the bisector $B(q_0, r)$, each point z in the interior of $\overline{q_0, p_0}$ is strictly closer to q_0 than to r, a contradiction.

If we apply theorem 2 to the subsets $\{p\}$ and S-$\{p\}$ it follows that the nearest neighbor of p is sitting in a neighboring Voronoi region. Therefore, it is sufficient to inspect, for each $p \in S$, all neighbors of p in the Voronoi region, and select the closest to them. Once for each p its nearest neighbor in S is known, we can easily determine a pair of points whose distance is a minimum. Thus, knowing the position of the vehicle (p) and the set of smart poles (q_i where $i \in S$), if we apply theorem 1 to these points using the Euclidean distance, it is easy to know which regions of Voronoi are the neighboring regions [18].

4 Experimental Results

Assuming that vehicles can communicate via wifi and have the ability to position themselves on the map, the V2V communications model we propose in this paper has the following improvements over the current V2V models: 1) V2V model via Voronoi regions does not overload the network with messages. This follows from the theorem 1, since $m > m_V$. So the communications model proposed in this paper needs a smaller number of messages so that the vehicles can circulate without traffic jams. In order to prove this result experimentally, a simulation has been designed with 1000 vehicles in a smart city and 3 scenarios: 1) The 1000 vehicles will use the current V2V communication models. 2) The 1000 vehicles will use our new V2V communications model using 20 Voronoi regions

and splitting the vehicles randomly among the 5 regions. 3) It is the same as scenario 2, but with 25 Voronoi regions. The results of the 3 scenarios will be presented for 5 minutes, taking into account that every second 2 information is sent by the V2V communications system.
Scenario 1: In this case study there are 1000 vehicles that are sending information by broadcast (they send information and receive response). The total number of messages in V2V communications in 5 minutes are

$$m_{scenario1} = (2times*5min)n(n-1) = 10*(1000*(1000-1)) = 9,990,000 \text{ msg.} \tag{5}$$

where n is the total number of vehicles. In scenario 1, approximately 10 million of messages were generated in 5 minutes.

Scenario 2: In this case study there are 1000 vehicles that are sending information by broadcast (they send information and receive response). In this case, there are 5 Voronoi regions and we assume that vehicles can move to another Voronoi region every minute randomly. The total number of messages in V2V communications in 5 minutes are

$$\begin{aligned} m_{minute1} &= (2 \text{ times}) \sum_{5} n_i(n_i - 1) = 452,080 \\ m_{minute2} &= (2 \text{ times}) \sum_{5} n_i(n_i - 1) = 480,508 \\ m_{minute3} &= (2 \text{ times}) \sum_{5} n_i(n_i - 1) = 517,524 \\ m_{minute4} &= (2 \text{ times}) \sum_{5} n_i(n_i - 1) = 470,996 \\ m_{minute5} &= (2 \text{ times}) \sum_{5} n_i(n_i - 1) = 651,628 \end{aligned} \tag{6}$$

Then:

$$\begin{aligned} m_{scenario2} =& m_{minute1} + m_{minute2} + m_{minute3} + m_{minute4} + m_{minute5} = \\ &= 2,572,736 \end{aligned}$$

where n_i is the total number of vehicles in each Voronoi region for each minute. In scenario 2, approximately 2.5 million of messages were generated in 5 minutes.

Scenario 3: In this case study there are 1000 vehicles that are sending information by broadcast (they send information and receive response). In this case, there are 25 Voronoi regions and we assume that vehicles can move to another Voronoi region every minute randomly. The total number of messages in V2V communications in 5 minutes are

$$\begin{aligned} &m_{scenario3} = \\ &m_{minute1} + m_{minute2} + m_{minute3} + m_{minute4} + m_{minute5} = \\ &= 462,460 \end{aligned} \tag{7}$$

where n_i is the total number of vehicles in each Voronoi region for each minute. In scenario 3, approximately 0.46 million of messages were generated in 5 minutes. In eq. 7 the calculations made for this scenario have been omitted because they are too long.

Once the calculations are completed in each of the scenarios, we will make a comparative analysis of the experimental results obtained in the following table:

Table 1. Ratio coefficient of comparison between scenarios.

Scenarios	Ratio coefficient
Scenario 1 vs Scenario 2	**3.88**
Scenario 1 vs Scenario 3	**21.6**
Scenario 2 vs Scenario 3	**5.56**

2) Encrypted data is stored, allowing for faster searches of stored data. This way one can make a real-time analysis of what is happening with all vehicles. In addition, in-depth audits can be conducted by the police in case of accidents.

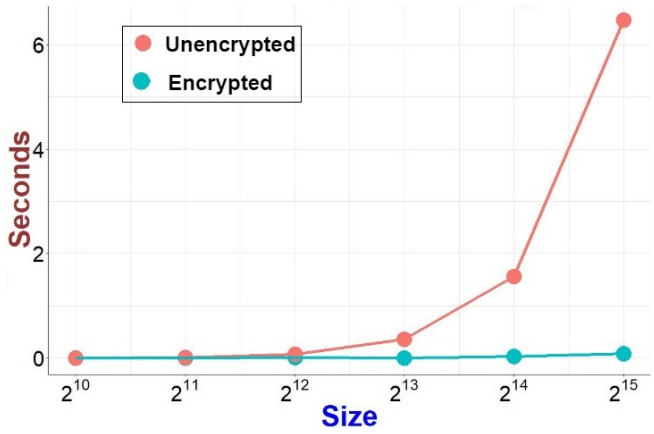


Fig. 2. In the figure it is shown that as the stored data grows, unencrypted searches are much larger than encrypted searches.

By placing an ATSHA204A encryption chip with SHA-256 technology, V2V communications data from vehicles in the Voronoi regions are sent to the central HDFS storage and processing node. The chip adds a key-value pair to the encrypted information it sends, speeding up the search process. To validate this result, a simulation has been done in a HDFS sandbox (Hortonworks) with an

array with 2^{15} encrypted V2V communications data and another array with 2^{15} unencrypted V2V communications data. In the Fig. 2 it can be found a random search of several elements in the network. On the other hand, the same process is done in blue, but this time the data is encrypted. Comparing both searches in the graph in Fig. 2 shows that the search in encrypted data is much more efficient than the search in unencrypted data.

5 Conclusion and future work

This works presents a novel V2V communication model based on Voronoi diagram to reduce the number of messages sent by V2V communications via edge computing. In this way, in the theorem 1 we have shown that $m > m_V$ (i.e. V2V communications without Voronoi regions are always more than those used by the V2V communications model with Voronoi regions). Experimental results from the 3 scenarios show that using Voronoi regions greatly reduces the number of messages sent in V2V communications. Moreover, the more regions of Voronoi, the fewer messages there are (see Table 1). In addition, the theorem 2 provides a simple way for vehicles to know which regions of Voronoi they will be moving to as they travel through the smart city. On the other hand, we have shown that communications stored in HDFS if encrypted, the time it takes to search for them is much shorter than if they are not encrypted.

In future work we will include blockchain technology in this new V2V communications model. From our best knowledge of blockchain technology in other fields, we think that adding blockchain to this new model of communications can enable us to trace the path that cars follow in the smart city [21] [22]. In addition, we will create predictive algorithms to detect traffic congestion based on Multi-Agent systems [23] [26], data quality [25] and Case based reasoning (CBR) [24]. Moreover, our research is applicable to the optimization of a V2V network (decreasing load and latency) that is required for real-time applications. In addiction, we will use hashmap to speed up searches instead of the key pair value added by the encryption chip in the current model.

Acknowledgments

This work was supported by the Spanish Ministry, Ministerio de Economía y Competitividad and FEDER funds. Project: SURF, Intelligent System for integrated and sustainable management of urban fleets TIN2015-65515-C4-3-R.

References

1. Li Z, Bai F, Fernandez J, Bhagavatula V. (2015) Tentpoles Scheme: a Data-aided Channel Estimation Mechanism for Achieving Reliable Vehicle-to-Vehicle Communications. IEEE Trans Wirel Commun 14(5):2487—2499

2. Ameixieira C, Cardote A, Neves F, et al. (2014) Harbornet: a real-world testbed for vehicular networks [J]. Communications magazine. IEEE 52(9):108-–114
3. ZH Mir, J Toutouh, F Filali, E Alba, Qos-aware radio access technology (rat) selection in hybrid vehicular networks, International Workshop on Communication Technologies for Vehicles, 117-128, 2016.
4. Jabbarpour MR, Marefat A, Jalooli A, Noor RM, Khokhar RH, Lloret J. (2015) Performance analysis of V2 V dynamic anchor position-based routing protocols. Wirel Netw 21(3):911-–929
5. Salameh N, Challita G, Mousset S, Bensrhair A, Ramaswamy S. (2013) Collaborative positioning and embedded multi-sensors fusion cooperation in advanced driver assistance system. Transportation Research Part C: Emerging Technologies 29:197—213
6. Isento JN, Rodrigues JJ, Dias J, Paula MC, Vinel A. (2013) Vehicular delay-tolerant networks-A novel solution for vehicular communications. Intelligent Transportation Systems Magazine, IEEE 5(4):10—19
7. Patil P, Gokhale A. (2013) Voronoi-based placement of road-side units to improve dynamic resource management in vehicular ad hoc networks collaboration technologies and systems (CTS), 2013 international conference on. IEEE:389—396
8. Sharef BT, Alsaqour RA, Ismail M. (2014) Vehicular communication ad hoc routing protocols: A survey. J Netw Comput Appl 40:363—396
9. Suthaputchakun C, Dianati M, Sun Z. (2014) Trinary Partitioned Black-Burst-Based Broadcast Protocol for Time-Critical Emergency Message Dissemination in VANETs. Vehicular Technology, IEEE Transactions on 63(6):2926-–2940
10. Ghafoor KZ, Lloret J, Sadiq AS, Mohammed MA. (2015) Improved Geographical Routing in Vehicular Ad Hoc Networks. Wirel Pers Commun 80(2):785—804
11. Liu P, Matolak DW, Ai B, Sun R. (2014) Path Loss Modeling for Vehicle-to-Vehicle Communication on a Slope. Vehicular Technology, IEEE Transactions on 63(6):2954—2958
12. Baccelli E, Jacquet P, Mans B, Rodolakis G. (2012) Highway vehicular delay tolerant networks: Information propagation speed properties. Information Theory, IEEE Transactions on 58(3):1743—1756
13. Djahel S, Doolan R, Muntean GM, Murphy J. (2015) A Communications-oriented Perspective on Traffic Management Systems for Smart Cities: Challenges and Innovative Approaches. Communications Surveys & Tutorials, IEEE 17(1):125-–151
14. Chang HJ, Park GT. (2013) A study on traffic signal control at signalized intersections in vehicular ad hoc networks. Ad Hoc Netw 11(7):2115—2124
15. Vaqar S, Basir O. (2009) Traffic pattern detection in a partially deployed vehicular ad hoc network of vehicles. Wireless Communications, IEEE 16(6):40-–46
16. Toutouh J., Alba E., A swarm algorithm for collaborative traffic in vehicular networks, Vehicular Communications 12, 127-137, 2018.
17. Toutouh J., Alba E., Parallel multi-objective metaheuristics for smart communications in vehicular networks, Soft Computing 21 (8), 1949-1961, 2017.
18. Hinrichs K., Nievergelt J., and Schorn P., Plane-sweep solves the closest pair problem elegantly. Inform. Process. Lett., 26:255-–261, 1988.
19. Casado-Vara, R., Prieto, J., & Corchado, J. M. (2018, June). How Blockchain Could Improve Fraud Detection in Power Distribution Grid. In The 13th International Conference on Soft Computing Models in Industrial and Environmental Applications (pp. 67-76). Springer, Cham.
20. Casado-Vara, R., González-Briones, A., Prieto, J., & Corchado, J. M. (2018, June). Smart Contract for Monitoring and Control of Logistics Activities: Pharmaceutical

Utilities Case Study. In The 13th International Conference on Soft Computing Models in Industrial and Environmental Applications (pp. 509-517). Springer, Cham.
21. Casado-Vara, R., Prieto, J., & Corchado, J. M. (2018, June). How Blockchain Could Improve Fraud Detection in Power Distribution Grid. In The 13th International Conference on Soft Computing Models in Industrial and Environmental Applications (pp. 67-76). Springer, Cham.
22. Casado-Vara, R., González-Briones, A., Prieto, J., & Corchado, J. M. (2018, June). Smart Contract for Monitoring and Control of Logistics Activities: Pharmaceutical Utilities Case Study. In The 13th International Conference on Soft Computing Models in Industrial and Environmental Applications (pp. 509-517). Springer, Cham.
23. Rodríguez S., De Paz J.F., Villarrubia G., Zato C., Bajo J., Corchado , Multi-agent information fusion system to manage data from a WSN in a residential home. Information Fusion 23, 43-57 (2015).
24. González-Briones, A., Rivas, A., Chamoso, P., Casado-Vara, R., & Corchado, J. M. (2018, June). Case-Based Reasoning and Agent Based Job Offer Recommender System. In The 13th International Conference on Soft Computing Models in Industrial and Environmental Applications (pp. 21-33). Springer, Cham.
25. Casado-Vara, R., Prieto-Castrillo, F., & Corchado, J. M. A game theory approach for cooperative control to improve data quality and false data detection in WSN. International Journal of Robust and Nonlinear Control.
26. Rodríguez, S., Palomino, C. G., Chamoso, P., Silveira, R. A., & Corchado, J. M. (2018, August). How to create an adaptive learning environment by means of virtual organizations. In International Workshop on Learning Technology for Education in Cloud (pp. 199-212). Springer, Cham.

Cómo visualizar la complejidad urbana a través del impacto de los alojamientos turísticos Airbnb

José-Miguel Fernández-Güell[1[0000-0002-4271-3127]] and Iván Rodríguez-Suárez[2[0000-0002-9139-0280]]

[1, 2] Departamento de Urbanística y Ordenación del Territorio, Universidad Politécnica de Madrid, Avenida Juan de Herrera 2, 28040 Madrid, Spain.
josemiguel.fernandez@upm.es
ivan.rsuarez@upm.es

Abstract. Hoy en día, la capacidad de los planificadores urbanos para generar una visión integrada de nuestras ciudades es todavía muy limitada. Muchos planes fracasan a la hora de entender la complejidad, diversidad, incertidumbre e inteligencia que determinan los rasgos de las ciudades contemporáneas. Dificultades adicionales surgen cuando los urbanistas tratan de involucrar a los agentes locales en el análisis de fenómenos urbanos complejos. Desde los años 60, múltiples enfoques cuantitativos han intentado replicar la complejidad y las dinámicas urbanas; sin embargo, estos modelos han estado plagados de dificultades técnicas y además no han sido adecuados para apoyar la planificación colaborativa con agentes locales.

Una forma de facilitar la involucración de agentes locales en el análisis y la planificación de temas urbanos complejos es la construcción de modelos conceptuales que puedan representar las dinámicas urbanas de forma comprensiva y holística. Esta ponencia presenta un modelo conceptual que visualiza la ciudad como un conjunto de diversos subsistemas interrelacionados entre sí: demanda urbana, oferta urbana, elementos espaciales y dispositivos tecnológicos. Para verificar la operatividad de este modelo conceptual, se ha elegido el caso de los alojamientos turísticos comercializados por Airbnb. Finalmente, se han extraído algunas conclusiones tentativas sobre las implicaciones del modelo propuesto respecto a la coordinación de políticas urbanas, la planificación colaborativa con agentes locales y los procesos educativos innovadores.

Keywords: Complejidad Urbana, Enfoque Sistémico, Alojamientos Airbnb

1 Rasgos de las ciudades contemporáneas

Hoy en día, cualquier planificador urbano debe ser capaz de interpretar los grandes rasgos de las ciudades contemporáneas. Se trata de entender la complejidad, diversidad, incertidumbre e inteligencia, que acompañan a la mayoría de los fenómenos urbanos [1, 2, 3].

1.1 Complejidad

Uno de los principales retos que afrontan las ciudades de tamaño grande y mediano es el elevado nivel de complejidad de los procesos urbanos que tienen lugar dentro de sus límites y en su área de influencia más próxima. Este atributo ha constituido un hándicap histórico que recurrentemente dificulta las tareas de análisis y la acertada formulación de políticas urbanas.

La denominada "ciencia de la complejidad" puede entenderse como un conjunto de ideas sobre la capacidad auto-organizativa y la naturaleza adaptativa de algunos sistemas complejos, como son el clima, los ecosistemas naturales, la economía y, cómo no, las ciudades [4, 5]. Esta ciencia ha emergido mayormente de estudios realizados en las áreas de Física, Biología, Matemáticas e Informática.

Un sistema puede definirse como un conjunto de elementos individuales en interacción mutua, que operan en un entorno determinado sujeto a factores externos, que se auto-organizan en sistemas superiores. A las condiciones anteriores, los denominados sistemas complejos añaden las siguientes: presentar dinámicas no lineales; ser capaces de transformarse y transformar su entorno creando estructuras altamente organizadas; tener elementos muy variados que les confieren mayor adaptabilidad a los cambios; y transformarse de modo poco predecible. En suma, un sistema complejo se caracteriza por el elevado número de elementos que lo componen, por el número y la variedad de las relaciones que los unen entre sí, y por la variedad de las dinámicas que se derivan de dicha unión.

Los conceptos anteriores son perfectamente trasladables a las ciudades contemporáneas ya que éstas son organismos muy complejos y variados, fruto de la invención de las sociedades humanas, con gran número de protagonistas y conexiones entre los mismos [6, 7]. La ciudad es un organismo que puede ser extremadamente resiliente frente a condiciones adversas, pero al mismo tiempo puede degradarse rápidamente ante actuaciones agresivas en su tejido físico-espacial. En suma, el estudio de la complejidad nos puede facilitar una visión más informada del funcionamiento de los sistemas urbanos así como de su evolución a lo largo del tiempo.

1.2 Diversidad

Un segundo reto al que se han enfrentado repetidamente los urbanistas constituye la diversidad inherente a cualquier ciudad de cierta complejidad [8, 9, 10]. Básicamente la diversidad urbana se despliega en tres dimensiones: funcional, social y política.

En primer lugar, la diversidad funcional de las ciudades viene generada por las diferencias en las características funcionales y morfológicas de cada ciudad. Las ciudades difieren entre sí por su ubicación geográfica, su trazado espacial, su vocación económica o su estructura socio-demográfica.

En segundo lugar, distinguimos la diversidad social que es generada por los diferentes grupos sociales, étnicos y raciales que habitan en las ciudades así como por los diferentes estilos de vida, actitudes y actividades que desarrollan sus habitantes.

En tercer lugar, puede hablarse de diversidad política fruto de la disparidad de agentes e intereses que se entrecruzan en las ciudades mínimamente complejas. En

una comunidad urbana democráticamente avanzada, las decisiones políticas son el producto de la influencia de muchos grupos, pero con diferentes niveles poder.

Evidentemente, los tres tipos de diversidad están intrínsecamente relacionados entre sí. Cuanto más sofisticadas y dispares sean las funciones de una ciudad, más diversos serán los agentes que intervienen en las mismas. En suma, la diversidad es un activo importante de las ciudades si se gestiona adecuadamente mediante la conciliación de sus intereses en los procesos de toma de decisiones.

1.3 Incertidumbre

El tercer reto que gravita sobre los planificadores es la constante incertidumbre que envuelve al futuro de las urbes [11, 12]. Todo aquel que se enfrenta con la tarea de prever el futuro de una ciudad a 15 o 20 años sufre impotente las limitaciones actuales de las herramientas de previsión de futuro, situación que se agrava si se opera en un entorno particularmente turbulento y muy cambiante.

El grado de dificultad para prever el futuro depende mucho del tipo de situación de partida en que nos encontremos. Así, en los sistemas que tienen parámetros muy estables, como es el caso de la órbita de los planetas, podemos obtener datos fiables y predecir los acontecimientos de futuro con bastante certeza. Por el contrario, si nos enfrentamos a sistemas muy complejos y dinámicos, como es el caso de las ciudades, los acontecimientos futuros no pueden ser definidos con precisión y, consecuentemente, son poco o nada previsibles.

Frente a las dificultades que entraña realizar previsiones en el ámbito urbano, suele surgir la tentación de abandonar la planificación a largo plazo y volcarse, en cambio, en actuaciones cortoplacistas. Sin embargo, un buen ejercicio de prospectiva ayuda a reflexionar estratégicamente sobre el devenir de la ciudad y constituye un ejercicio valioso para los agentes decisores urbanos.

1.4 Inteligencia

El cuarto atributo de las ciudades contemporáneas es la inteligencia. Para prosperar en un mundo complejo e incierto, las ciudades necesitan grandes dosis de inteligencia. Para algunos autores, inteligencia urbana significa maximizar todas las posibles conexiones dentro de la ciudad para mejorar sus operaciones [13, 14], mientras que para otros, el término está estrechamente relacionado con el concepto de “Smart City” porque se refiere a los dispositivos tecnológicos [15]. En este artículo, se entiende el término inteligencia como la capacidad de los agentes locales para utilizar de forma efectiva y eficiente las nuevas tecnologías con el fin de gestionar las operaciones urbanas y tomar decisiones bien informadas.

Una ciudad inteligente debería considerar la dimensión humana de la ciudad en toda su complejidad y diversidad, debería asumir su comportamiento imprevisible y debería promover un modelo avanzado de gobernanza que involucrara a un gran número agentes locales y ciudadanos. En este sentido, la literatura científica más reciente reconoce la necesidad de desarrollar enfoques más integrados y holísticos para las

Ciudades Inteligentes [16] a través de soluciones que operen de forma interconectada y sinérgica [17, 18].

En suma, el aumento cualitativo de la complejidad, diversidad, incertidumbre e inteligencia urbana complica enormemente la planificación de las ciudades. Así pues, las cuestiones clave para dar respuesta a los retos residen en ¿cómo comprender y expresar de forma inteligible la complejidad de la ciudad?, ¿cómo incorporar la diversidad de los agentes urbanos en el proceso de toma de decisiones?, ¿cómo valorar y manejar la incertidumbre? y ¿cómo utilizar eficaz y eficientemente la tecnología?

2 Hacia un enfoque más amigable de la complejidad urbana

Hoy en día, es frecuente entre los planificadores discutir acerca del nivel de complejidad de las ciudades y de la conveniencia de incorporar la ciencia de la complejidad en la planificación urbana. Sin embargo, cuando llega el momento de poner en la práctica estos enfoques junto con la participación de los agentes locales, el intento alcanza un punto muerto.

2.1 Intentos previos para afrontar la complejidad urbana

Desde los años 60, el enfoque tradicional para abordar la complejidad urbana ha sido la teoría de sistemas. El trabajo pionero de *Ludwig von Bertalanffy* sobre la Teoría General de Sistemas [19] y el de *Jay W. Forrester* sobre la Dinámica de Sistemas [20] abrió la puerta a contribuciones específicas para la comprensión sistémica de la ciudad. En ese sentido, los trabajos de *John McLoughlin y Brian Berry* sobre la aplicación de la teoría de sistemas a la planificación urbana y regional [21, 22], de *Jay Forrester* sobre dinámica urbana [23] y de *Ira Lowry* sobre modelos de transporte [24] son bien conocidos en el área de Urbanismo.

Estas contribuciones innovadoras para comprender las ciudades como sistemas funcionales dieron lugar a la primera generación de modelos urbanos de gran escala durante los años 60 y 70. Sin embargo, estos primeros esfuerzos por aplicar sofisticados modelos cuantitativos en los programas de renovación urbana de las ciudades de Pittsburgh, Nueva York y Los Ángeles fueron sonados fracasos [25, 26]. Estos modelos fueron severamente criticados porque demandaban grandes volúmenes de datos y proporcionaban poco detalles, no contemplaban variables para las que no había datos disponibles, reforzaban una planificación orientada al control y eran muy caros [27, 28]. Desde nuestra perspectiva actual, estos modelos no fueron capaces de interpretar y simular la complejidad de la ciudad.

Tres décadas más tarde, el *Instituto de Santa Fe*, en Nuevo México, empezó a trabajar con el concepto de “Sistemas Complejos Adaptativos” [29, 30, 31]. Pronto los científicos de Santa Fe se dieron cuenta que la ciudad era uno de los ecosistemas adaptativos más complejos porque abarcaba una multitud de diferentes agentes interactuando entre sí y el entorno. El investigador *Geoffrey West*, consideraba que la ciudad exhibía capacidades para crear estructuras emergentes y para auto-organizarse [32]. Ciertamente, este nuevo concepto enriquecía el enfoque original de la teoría de

sistemas, pero complicaba sustancialmente el análisis urbano y la predicción de la evolución futura de la ciudad.

Más recientemente, las iniciativas sobre ciudades inteligentes han propuesto enfoques sistémicos integrados, apoyados en un amplio abanico de nuevas técnicas, con el fin de superar la proliferación de silos tecnológicos en el ámbito urbano [32, 33]. Estas técnicas incluyen teoría de redes, modelos basados en agentes, autómatas celulares y teoría escalar. El nuevo enfoque integrado e inteligente trata de abordar temas multidisciplinares como la adaptabilidad, la robustez, la resiliencia y el conflicto en el ámbito urbano. Sin embargo, se ha producido un escaso progreso en el desarrollo de proyectos "smart" capaces de abordar de forma integrada las complejas dinámicas urbanas [34, 17, 18].

En paralelo a las anteriores líneas de investigación, en los últimos treinta años se han producido algunas contribuciones interesantes en la confluencia de filosofía y sociología. Concretamente los trabajos del Sociólogo *Niklas Luhmann* [35] aportan reflexiones interesantes sobre la teoría de sistemas que ponen en cuestión la concepción tradicional sobre la dinámica de los sistemas estables versus inestables en función de sus relaciones con el entorno. Estas reflexiones todavía no han sido trasladadas al ámbito urbano, pero prometen hallazgos interesantes para entender mejor las dinámicas complejas en las que operan las ciudades contemporáneas.

En suma, tras la experiencia iniciática de los modelos de los años 60, los planificadores han abordado la complejidad urbana utilizando bien narrativas basadas en modelos conceptuales o bien modelos de simulación sectoriales, pero en la mayoría de las ocasiones han evitado cuidadosamente los modelos cuantitativos integrados [36]. No obstante, a medida que las ciudades se adentran en el siglo XXI, resulta crítica la comprensión de las dinámicas urbanas, las redes y la complejidad para que se puedan elaborar visiones y políticas con ciertas garantías de éxito.

2.2 Hacia un nuevo enfoque para visualizar la complejidad urbana

Aunque académicamente interesantes, la mayoría de los modelos cuantitativos basados en la teoría de sistemas no son fáciles de ejecutar en los procesos colaborativos con agentes locales debido al elevado nivel de destrezas técnicas requeridas para esbozar temas urbanos complejos [37]. Enfrentados a estas circunstancias, los planificadores deberían desarrollar marcos conceptuales más cualitativos y amigables con un doble objetivo: interpretar la complejidad urbana de una forma más holística y facilitar la involucración efectiva de agentes locales en el proceso de planificación. Consecuentemente, nuestra hipótesis de trabajo es que los nuevos modelos conceptuales deberían reunir cuatro condiciones básicas.

Primero, la naturaleza compleja de las ciudades debe evidenciarse mostrando los diversos subsistemas funcionales urbanos así como los múltiples agentes locales, y sus relaciones, que intervienen en las decisiones y políticas urbanas. En este sentido, los mapas conceptuales y diagramas de procesos ayudan a estructurar los fenómenos complejos mediante el despliegue gráfico de todas las variables y la escenificación del rol jugado por los diversos agentes locales.

Segundo, la planificación colaborativa con agentes locales en relación a temas complejos urbanos se facilita mediante el desarrollo de nuevas herramientas de comunicación. Con este fin, las diversas técnicas de dinámicas de grupos permiten tanto alcanzar consensos como gestionar disensos entre los agentes locales.

Tercero, los continuos cambios del entorno urbano provocan la continua reconfiguración de los sistemas urbanos y de las redes de actores en la ciudad acrecentando la incertidumbre en la toma de decisiones. Bajo estas circunstancias, las herramientas de prospectiva son fundamentales para formular visiones de futuro robustas y plausibles, que a su vez son compartidas con los agentes locales.

Cuarto, el cambiante y complejo contexto urbano obliga a utilizar enfoques de investigación innovadores, capaces de manejar problemas interconectados y "borrosos". En lugar de afrontar estos retos a través de la resolución de problemas claramente definidos con herramientas cuantitativas convencionales, deberíamos responder creativamente con "agendas borrosas" tributarias de la "lógica borrosa", basadas en la "inteligencia colectiva evolutiva" y en herramientas de análisis cualitativas.

En suma, un nuevo modelo conceptual basado en las premisas anteriores podría proporcionar apoyo conceptual a los planificadores espaciales que actualmente están esforzándose por lograr una comprensión holística de la estructura y las operaciones de una ciudad, mientras que ésta evoluciona en un contexto incierto. Debe aclararse que el propósito de este nuevo modelo no debe ser proporcionar datos precisos extraídos de sofisticados algoritmos matemáticos, sino muestras inteligibles que puedan ayudar a los agentes locales a entender las complejidades de las ciudades.

Asumiendo las premisas anteriores, el reto central de esta investigación consiste en cómo mostrar la complejidad de los diversos subsistemas urbanos de manera que los múltiples agentes locales que intervienen en el proceso de planificación puedan visualizar los fenómenos urbanos con toda su complejidad. Para ello, nos apoyamos en técnicas innovadoras utilizadas en otras áreas de conocimiento, como son "conceptual modeling" [38], "mind mapping" [39] y "process tracing" [40].

Una mezcla de estas técnicas ha sido empleada para construir un modelo conceptual que explicara la compleja operativa de las ciudades contemporáneas. Entendemos un modelo conceptual como una abstracción de un sistema físico o social a través de una serie de conceptos y principios con el propósito de que otras personas puedan entender y simular ese sistema. Así pues, un modelo conceptual mejora la comprensión de un sistema urbano, transmite los detalles del sistema a los agentes locales y proporciona un medio para facilitar la colaboración entre agentes [41].

2.3 Método de investigación

El enfoque sistémico aplicado a ciudades fue desarrollado y validado con 45 agentes urbanos españoles durante un período de cuatro años. La investigación se basó en una mezcla de actividades académicas y de consultoría que progresivamente añadieron valor al producto final. La secuencia cronológica del proceso de validación fue aproximadamente como sigue.

Un modelo sistémico preliminar comenzó a tomar forma durante 2013 como resultado del análisis de gabinete. En 2014 como parte de un ejercicio de prospectiva, se

desarrolló un modelo conceptual para estudiar la evolución deseable de las ciudades españolas hacia el horizonte 2030 [42]. En 2015, el modelo conceptual fue sometido al juicio de académicos y profesionales del urbanismo, fue presentado en dos congresos internacionales y fue publicado en revistas científicas [43, 3]. En 2016, el modelo fue validado por diversos técnicos del Ayuntamiento de Madrid. Como resultado de estas evaluaciones externas, diversos ajustes y modificaciones fueron introducidos en el modelo hasta alcanzar su estado actual.

3 Modelo conceptual de la ciudad

Una forma de dar cumplida respuesta a las preguntas anteriores consiste en entender a la ciudad contemporánea como un complejo ecosistema de elementos o partes conectadas, donde las actividades humanas están enlazadas por comunicaciones que interactúan en tanto el conjunto sistémico evoluciona dinámicamente. En este sistema, cualquier alteración espacial o estructural en una de sus partes modifica las otras partes del sistema. Adicionalmente, los sistemas urbanos operan en un determinado contexto socio-económico y natural, interactuando con él de manera constante. En suma, el fuerte dinamismo de los procesos urbanos junto a la intensa interacción de los elementos y agentes urbanos es lo que caracteriza la complejidad de las ciudades.

Con el propósito de explicar de forma simplificada la compleja operativa del sistema urbano contemporáneo, se propone un modelo conceptual en el que se despliega el funcionamiento de la ciudad (ver **Fig. 1**). Así, en primer lugar, la demanda urbana plantea una serie de exigencias a los diversos subsistemas de la oferta urbana; en segundo lugar, estas exigencias son recogidas, interpretadas y jerarquizadas por los subsistemas económico, social, ambiental y político; en tercer lugar, los subsistemas anteriores trasladan demandas específicas al subsistema físico-espacial, capaz de dar respuesta a las necesidades espaciales de la sociedad urbana; y en cuarto lugar, el soporte tecnológico presta apoyo transversal a los diversos subsistemas urbanos. Finalmente, el sistema en su conjunto está sometido a diversos factores de cambio del entorno. Obviamente, en la vida real este flujo de operaciones no es estrictamente lineal, sino que suele estar plagado de bucles y retroalimentaciones.

A continuación, se presentan los rasgos principales de cada subsistema urbano.

Demanda urbana. Está compuesta por ciudadanos, agentes económicos, agentes sociales y visitantes, los cuales plantean una serie de requisitos para vivir y trabajar adecuadamente en la ciudad. Dichas demandas deben satisfacerse a través de la prestación de servicios y la provisión de productos por parte de los diversos subsistemas de la oferta urbana.

Subsistema económico. Es la parte de la oferta urbana orientada a satisfacer las necesidades de empleo y bienestar económico de la población así como a cubrir las exigencias de los agentes económicos para desarrollar de forma competitiva sus actividades productivas y comerciales.

Subsistema social. Comprende aquellos elementos de la oferta urbana que tratan de satisfacer las necesidades básicas y avanzadas tanto de la población residente como de los visitantes que acuden a la ciudad.

Subsistema ambiental. Incluye aquellos elementos de la oferta urbana dedicados a la preservación y el desarrollo de un medio ambiente urbano y natural acorde con las aspiraciones de la ciudadanía y de los agentes socioeconómicos.

Subsistema de gobierno. Representa a aquellos actores y elementos de la oferta urbana que proporcionan los modelos y los instrumentos de gobernanza necesarios para lograr una armoniosa convivencia en el ámbito urbano.

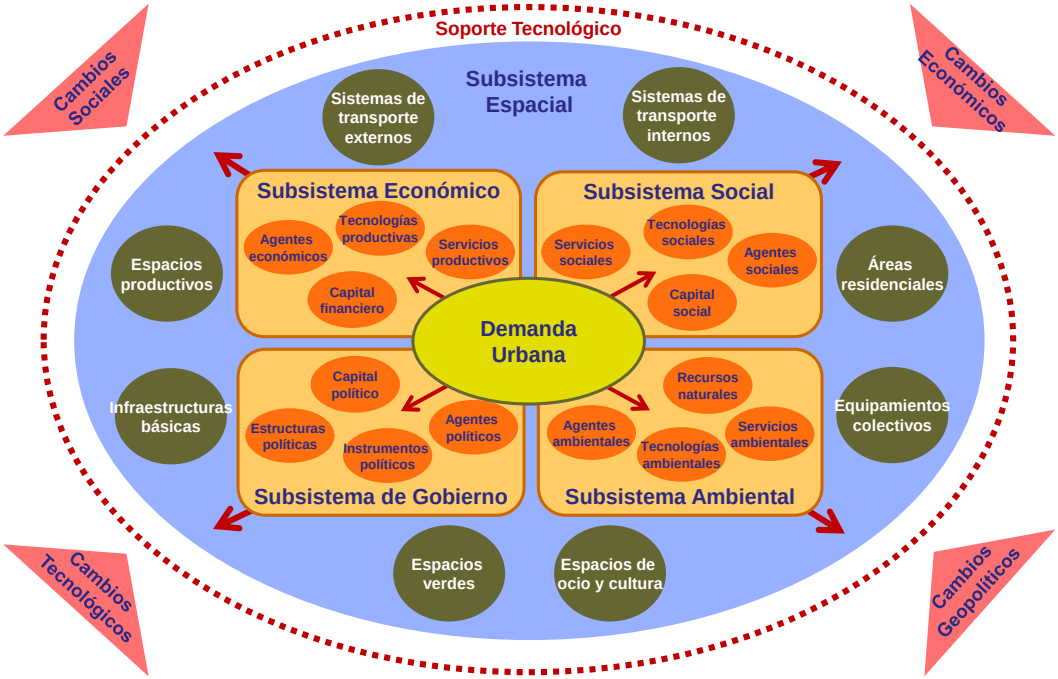


Fig. 1. Sistema funcional urbano (Fuente: Elaboración propia)

Subsistema espacial. Este subsistema recibe y da respuesta espacial a las demandas urbanas, una vez que son tamizadas e interpretadas por los subsistemas económico, social, ambiental y político. Sus principales elementos son: los sistemas de transporte para acceder a la ciudad; los sistemas de movilidad para desplazarse en la ciudad; los espacios para alojar actividades económicas; las infraestructuras ligadas a los servicios públicos; las áreas residenciales; los equipamientos colectivos; los espacios verdes; y las áreas recreativas.

Soporte tecnológico. Constituye un elemento de carácter transversal que proporciona apoyo tecnológico a la operativa de los subsistemas urbanos ya descritos. En términos generales, este elemento está dominado por las tecnologías de información y comunicación, que suelen ser la armadura en las ciudades de las iniciativas “Smart”.

Factores del entorno. Existen múltiples factores geopolíticos, sociales, económicos, tecnológicos y políticos exógenos a la ciudad, pero que afectan a su funcionamiento y equilibrio.

Aún a riesgo de ser tachada de reduccionista, la conceptualización sistémica de la ciudad tiene una clara ventaja: nos permite plantear una abstracción simplificada e inteligible de la complejidad inherente a la realidad urbana, que resulta fácilmente asimilable por los agentes locales y los propios ciudadanos. De esta forma, se pueden describir y explicar las variadas y complejas relaciones que se desarrollan entre los diversos componentes urbanos, sin olvidar que el proceso de cambio de una ciudad no es secuencial (un elemento afecta directamente a otro), sino más bien simultáneo (cada elemento urbano afecta a otros en su dinámica adaptativa).

4 El impacto de la plataforma colaborativa Airbnb en el sistema funcional urbano

Con el fin de comprobar la operatividad del modelo conceptual propuesto, se ha elegido como caso ilustrativo el fenómeno reciente de los alojamientos turísticos comercializados a través de plataformas colaborativas, como Airbnb, que operan en internet.

La economía colaborativa, término que denomina el intercambio de bienes y servicios entre individuos a través de soportes tecnológicos que facilitan el intercambio directo sin necesidad de intermediación, se está expandiendo rápidamente en la sociedad española.

Uno de los sectores que ha experimentado un gran crecimiento de la economía colaborativa ha sido el alquiler de alojamientos turísticos, liderado por la empresa Airbnb. Este tipo de plataformas ofertan Alquileres de Corta Duración (ACD) en la modalidad de comercialización P2P (peer to peer), operando como intermediarios y facilitando las transacciones entre anfitriones que ofrecen su piso y viajeros que buscan alojamiento. La proliferación de este revolucionario modelo de negocio está impactando de manera notoria las dinámicas urbanas mediante la redefinición de la noción tradicional de alojamiento vacacional [44, 45, 46, 47, 48].

El efecto del negocio de Airbnb en la ciudad puede describirse y visualizarse en el modelo funcional propuesto en los términos siguientes (ver Fig. 2).

Demanda urbana. Los agentes principales de la demanda son los turistas y visitantes que se alojan mediante ACD, los anfitriones que los ofrecen y los ciudadanos de las zonas afectadas por su proliferación. Aunque parte de esta demanda turística puede ser sustitutiva de la que se aloja en hoteles, buena parte de ella se compone de viajeros cuya demanda no se había satisfecho previamente y que buscan otro tipo de prestaciones en el alojamiento que contratan, actuando como demanda sustitutiva de los usos residenciales. Respecto a los anfitriones, son de dos tipos fundamentales: propietarios particulares de viviendas que las ofrecen parcial o totalmente en ACD, complementando sus ingresos; y “multianfitriones” que ofrecen varios alojamientos de forma profesionalizada y que, por lo general, se organizan mediante estructuras empresariales. Por su parte, los ciudadanos residentes en las zonas centrales con mayor presión turística asisten a cambios acelerados en sus vecindarios.

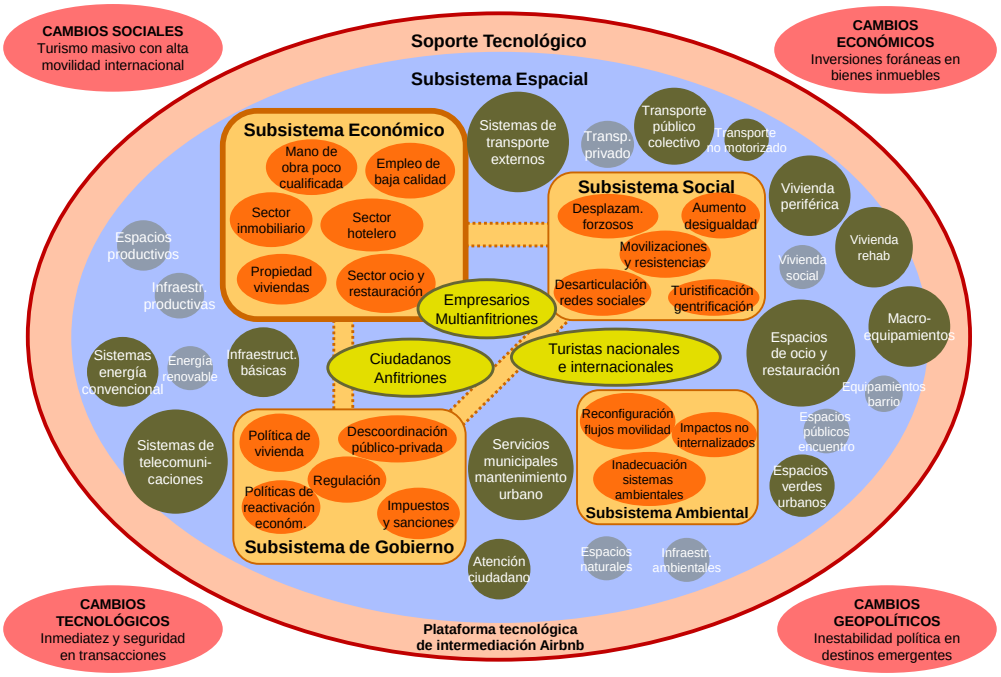


Fig. 2. Implicaciones de Airbnb en el sistema funcional urbano (Fuente: Elaboración propia)

Subsistema económico. Es el subsistema preeminente y opera con autonomía del resto, aunque sometido a presiones de los subsistemas de gobierno y social. Sus características principales son: incremento de la demanda inmobiliaria; competencia directa al sector hotelero; incremento de los valores inmobiliarios y fomento de la propiedad de viviendas, con predominio de su concepción como valor de cambio e inversión; y aumento de oferta de ocio y restauración asociada a la reducción de usos de actividades económicas tradicionales, como el comercio de proximidad. Como consecuencia, la mayor parte del empleo generado es de baja calidad y la mano de obra demandada es de baja cualificación.

Subsistema social. Aunque los afectados inicialmente son los ciudadanos de las zonas centrales, donde existe mayor concentración de pisos turísticos, los efectos se extienden a todo el subsistema social urbano. Los desplazamientos de la población de estas zonas a la periferia, sean éstas voluntarias, por la mayor rentabilidad que ofrecen los pisos turísticos a los propietarios, o forzadas, en el caso de los residentes en régimen de alquiler por el aumento de las rentas, conllevan la desarticulación de las redes sociales existentes y se acompañan de movilizaciones y resistencias de grupos vecinales organizados. Todo ello se traduce en procesos de gentrificación y turistificación de los centros, que redundan en un incremento de la desigualdad intraurbana.

Subsistema ambiental. Los principales efectos ambientales del fenómeno se traducen en modificaciones en las relaciones existentes entre espacios y usos, condicionan-

do los flujos de movilidad, materia y energía en los canales desarrollados al efecto, y poniendo en cuestión su adecuación a la nueva situación. Se trata de efectos contradictorios, puesto que los nuevos usos introducidos en los centros pueden suponer la puesta en carga de patrimonio en desuso, aumentando la utilidad del parque edificado, aunque con la consiguiente presión sobre los sistemas ambientales existentes, y los desplazamientos de población hacia la periferia podrían aumentar el consumo de suelo y la expansión de la ciudad más allá de sus límites actuales. Por otra parte, los nuevos usos turísticos no internalizan sus costes ambientales, debiendo ser asumidos por los poderes públicos y con carácter paliativo una vez que se han producido.

Subsistema de gobierno. Durante las fases iniciales del proceso, y ante la celeridad a la que se produce, los actores gubernamentales asisten al mismo como meros espectadores y carecen de instrumentos de gobernanza y regulación adecuados. Los instrumentos tradicionales de regulación en los centros urbanos centran sus objetivos en la preservación, recuperación y puesta en valor del patrimonio, mediante la regulación de los procesos constructivos y edificatorios. Los rígidos y lentos procedimientos administrativos se muestran inadecuados para dar respuesta a la rapidez y flexibilidad de la economía colaborativa. De manera gradual y con importantes fricciones y descoordinación con el subsistema económico, los gobiernos municipales reaccionan a las presiones del subsistema social e intentan controlar el proceso mediante la introducción de regulaciones específicas para los usos turísticos. Todo ello obliga a las administraciones públicas a modificar la política de vivienda, proteger los usos no turísticos, crear impuestos específicos y realizar inspecciones para sancionar a aquellos agentes que operen sin observar las nuevas regulaciones.

Subsistema espacial. Las transformaciones espaciales derivadas del fenómeno comienzan en el patrimonio privado y acaban extendiéndose y afectando al patrimonio público. El soporte físico y espacial de la ciudad tiene una capacidad de respuesta y transformación lenta y limitada, por lo que en primer lugar son los usos los que se adaptan a los soportes existentes y sólo cuando su inadecuación se hace evidente acaban por ser transformados. El proceso se inicia con la puesta en carga como ACD de viviendas individuales, que estaban siendo utilizadas en régimen de propiedad o alquiler o que se encontraban vacías. Este proceso no conlleva intervenciones significativas sobre el parque edificado, se extiende progresivamente sobre los edificios de uso residencial y acaba por aislar a los vecinos iniciales. El aumento de la demanda y la rentabilidad de los nuevos usos hacen que las viviendas de uso turístico colonicen usos obsoletos, edificios en estado de abandono y edificios habitados completos, mediante rehabilitaciones e intervenciones edificatorias de mayor alcance. Por su parte, los usos de actividades económicas tradicionales se sustituyen por usos destinados a los turistas, fundamentalmente de ocio, comercio y hostelería, y con predominio de franquicias de marcas globales. El espacio público funciona como conector de los diversos usos y los equipamientos turísticos, mientras que las dotaciones públicas tradicionales son marginadas y acaban transformándose en macro-equipamientos al servicio de los turistas. Como consecuencia, los tejidos centrales tienden a simplificarse por pérdida de variedad urbana y la presión de la demanda de vivienda permanente se traslada a las periferias, que deben acoger a nuevas poblaciones de mayor poder adquisitivo que, a su vez, desplazan a las poblaciones periféricas originales a

periferias más alejadas. El sistema de transportes, infraestructuras y espacios verdes existentes se presenta inadecuado para responder a las nuevas demandas turísticas.

Soporte tecnológico. La pieza fundamental de la proliferación de los pisos turísticos es la plataforma tecnológica de intermediación entre anfitriones y turistas, en este caso la de Airbnb, que, sin necesidad de inversiones iniciales en capital fijo, pone en valor bienes y servicios que venían siendo usados con otras finalidades.

Factores del entorno. Los factores externos que afectan a la actividad turística son múltiples y cambian a gran velocidad. Entre los más destacados pueden citarse: el aumento de la movilidad internacional y del turismo masivo, el destino de los flujos financieros internacionales a inversiones inmobiliarias, la inmediatez y seguridad creciente en las transacciones, o la inestabilidad política de otros destinos turísticos.

En suma, el modelo de negocio de Airbnb da lugar a un fenómeno urbano altamente complejo que genera implicaciones significativas en los diversos subsistemas funcionales de nuestras ciudades. La visualización de esos impactos en el modelo conceptual propuesto muestra como el sistema funcional urbano está dominado por el subsistema económico turístico, los visitantes y los anfitriones de los alojamientos turísticos. Este dominio debilita o fricciona las relaciones entre el subsistema económico y los subsistemas social y de gobierno, mientras que aísla al subsistema ambiental ignorando los impactos ambientales de la actividad turística. Finalmente, esta modalidad de turismo urbano efectúa demandas al subsistema espacial de determinados servicios o equipamientos muy por encima de las necesidades habituales de la población residente. En otras palabras, se trata de una actividad económica sumamente desequilibrante del sistema urbano.

5 Conclusiones

De los hallazgos obtenidos a lo largo del proceso investigador en el que se ha puesto en práctica el modelo conceptual del sistema funcional urbano, pueden deducirse una serie de **implicaciones** para las Ciencias Urbanas.

Implicaciones para la coordinación de políticas urbanas. El modelo sistémico propuesto puede ser utilizado como una herramienta transversal para coordinar estrategias y acciones entre diferentes organizaciones públicas involucradas en los procesos de planificación urbana. Por un lado, la coordinación sectorial es necesaria entre múltiples unidades administrativas (economía, urbanismo, transporte, medio ambiente, etc.) que intervienen en la formulación de políticas urbanas. Por otro lado, ciudades complejas requieren esfuerzos intensos y continuados para coordinar territorialmente las acciones públicas, ya sean de tipo vertical (niveles nacional, regional y local) u horizontal (varios municipios dentro de un área metropolitana). Asimismo, este modelo puede proporcionar ideas útiles a los analistas urbanos antes de capturar datos voluminosos y de correr sofisticados modelos matemáticos que tienden a sobre simplificar realidades complejas.

Implicaciones para la planificación colaborativa con agentes locales. Un enfoque sistémico inteligible puede ser de gran ayuda para facilitar la involucración de los agentes locales en el proceso de planificación. De hecho, los agentes locales que par-

ticiparon en la investigación expresaron su apoyo hacia el modelo conceptual. Primero, agradecieron el despliegue gráfico de la estructura y del funcionamiento de sistemas urbanos complejos que podían entender fácilmente. Segundo, ganaron una mejor comprensión de las complejas relaciones urbanas. Tercero, el modelo conceptual facilitó la colaboración entre diversos agentes locales y técnicos municipales. Cuarto, el enfoque propuesto resultaba ser bastante amigable para los decisores y manejable para los técnicos.

Implicaciones para procesos educativos innovadores. Jay Forrester [49] sugirió que el enfoque sistémico debía introducirse en las escuelas de urbanismo para que los estudiantes pudieran familiarizarse con la complejidad urbana. El pensamiento sistémico podría proporcionar una base unificadora para conectar los estudios de matemáticas, medio ambiente, sociología y urbanismo, lo que ayudaría a los estudiantes a romper las fronteras entre disciplinas. En este sentido, el modelo conceptual propuesto es un primer paso útil para que los estudiantes entiendan las complejas relaciones funcionales entre subsistemas urbanos.

Sin embargo, en su presente estado de desarrollo, el modelo propuesto tiene varias **limitaciones**. Primera, se trata de un modelo conceptual que necesita ser aplicado en ciudades reales para verificar rigurosamente su viabilidad. Este test capacitará a los investigadores comprobar la plausibilidad del enfoque y proporcionará a los planificadores con una hoja de ruta para mejorar los análisis urbanos.

Segunda, es preciso realizar más trabajo exploratorio para determinar si la involucración de los agentes locales en la interpretación del sistema funcional aporta valor al proceso de planificación. Asimismo, se requiere trabajo adicional para evaluar si este enfoque sistémico mejora las destrezas de los agentes locales para desbrozar los temas urbanos más complejos.

Tercera, el modelo conceptual, tal y como se presenta en estos momentos, no contempla la posibilidad de insertar modelos cuantitativos que, indudablemente, enriquecerían el enfoque propuesto. Un uso concurrente de herramientas cuantitativas y cualitativas ayudaría a dimensionar los flujos entre subsistemas funcionales y los impactos de las políticas urbanas. Aunque las herramientas cuantitativas podrían mejorar la precisión del modelo, nunca deberían gobernarlo porque desincentivaría la involucración de los agentes locales.

Estas limitaciones expresan claras oportunidades para desarrollar futuras líneas de investigación que realcen el potencial para incorporar este enfoque sistémico en el proceso de planificación urbana.

Referencias

1. Camagni, R.: Incertidumbre, capital social y desarrollo local: enseñanzas para una gobernabilidad sostenible del territorio. Investigaciones Regionales, 2, 31-57 (2003).
2. Fernández Güell, J. M.: Planificación estratégica de ciudades: Nuevos instrumentos y procesos. Editorial Reverté, Barcelona (2006).
3. Fernández Güell, J.M.: Ciudades Inteligentes: La mitificación de las nuevas tecnologías como respuesta a los retos de las ciudades contemporáneas. Economía Industrial 395, 17-28 (2015).

4. Holland, J.: Hidden Order: How Adaptation Builds Complexity. Addison-Wesley, Redwood City, CA (1995).
5. Stacey, R.D.: The science of complexity: An alternative perspective for strategic change processes. Strategic Management Journal, 16 (6), 477-495 (1995).
6. Allen, P.M.: Cities and regions as evolutionary complex systems. Geographical Systems, 4, 103-130 (1997).
7. Portugali, J., Meyer, H., Stolk, E., Tan, E.: Complexity theories of cities have come of age: an overview with implications to urban planning and design. Springer, New York (2012).
8. Alexander, C.: A city is not tree. Architectural Forum, 122 (1), 58-61 (1965).
9. Innes, J., Booher, D.: Consensus building and complex adaptive systems: a framework for evaluating collaborative planning. Journal of the American Planning Association, 65 (4), 412-423 (1999).
10. Jacobs, J.: The death and life of great American cities. Random House, New York (1961).
11. Abbott, J.: Understanding and managing the unknown: The nature of uncertainty in planning. Journal of Planning Education and Research, 24, 237-251 (2005).
12. Klosterman, R.: Lessons learned about planning: forecasting, participation, and technology. Journal of the American Planning Association, 79, 161-169 (2013).
13. Moss, M.: "The Information City in the Global Economy". Cities of the 21st Century. John Wiley & Sons, New York (1991).
14. Mitchell, W.: Me ++: The cyborg-self and the networked city. MIT Press, Cambridge (2003).
15. Hollands, R.: "Will the real smart city stand up? Intelligent, Progressive, or Entrepreneurial?" City 12 (3), 302-320 (2008).
16. Chourabi, H., Nam, T., Walker, S., Ramón Gil-García, J., Mellouli, S., Nahon, K., Pardo, T.A. & Jochen Scholl, H.: Understanding Smart Cities: An Integrative Framework. Proceedings of 45th Hawaii International International Conference on Systems Science, HICSS-45 2012, 4-7, Maui, HI, USA, 2289-2297 (2012).
17. Mattoni, B., Gugliermetti, F., Bisegna, F.: A multilevel method to assess and design the renovation and integration of Smart Cities. Sustainable Cities and Society, 15, 105-119 (2015).
18. Lombardi, P., Giordano, S., Farouh, H., Yousef, W.: Modelling the smart city performance", Innovation: The European Journal of Social Science Research, 25 (2), 137-149 (2012).
19. Bertalanffy, L.: General Systems Theory: Foundations, Development and Applications. Braziller, New York (1968).
20. Forrester, J.W.: Industrial Dynamics. The MIT Press, Cambridge (1961).
21. McLoughlin, J.B.: Urban and regional planning: a systems approach. Praeger, New York (1969).
22. Berry, B.J.: Cities as systems within systems of cities. Papers in Regional Science, 13 (1), 147-163 (1964).
23. Forrester, J.W.: Urban dynamics. MIT Press, Cambridge (1969).
24. Lowry, I.S.: A model of metropolis. Santa Monica, CA: the RAND Corporation, RM-4035-RC (1964).
25. Lee, D.: Requiem for large-scale models. Journal of the American Institute of Planners, 39 (3), 163-178 (1973).
26. Brewer, G.: Bureaucrats, politicians and the consultant. Basic Books, New York (1973).
27. Batty, M.: A chronicle of scientific planning: the Anglo-American modeling experience. Journal of the American Planning Association, 60 (1), 7-16 (1994).

28. Lee, D.: Retrospective on large-scale urban models. Journal of the American Planning Association, 60 (1), 35-40 (1994).
29. Gell-Mann, M.: The quark and the jaguar: adventures in the simple and the complex. W. H. Freeman, New York (1994).
30. Kauffman, S.: At home in the Universe: The search for the laws of self-organization and complexity. Oxford University Press, New York (1995).
31. Waldrop, M.: Complexity: The Emerging Science at the Edge of Order and Chaos. Simon & Schuster, New York (1992).
32. West, G. B.: Integrated sustainability and the underlying threat of urbanization. Global Sustainability: A Nobel Cause, Schellnhuber, H., Molina, M., Stern, N., Huber, V. &Kadner, S. (editors). Cambridge University Press, Cambridge (2010).
33. Söderström, O., Paasche, T. & Klauser, F.: Smart cities as corporate storytelling. City, 18 (3), 307-320 (2014).
34. Hollands, R.: Critical interventions into the corporate smart city. Cambridge Journal of Regions, Economy and Society, 8, 61-77 (2015).
35. Luhmann, N.: Introduction to systems theory. Polity Press, Cambridge, UK (2013).
36. Roo, G. De, Silva, E. (editors): A planner's encounter with complexity. Ashgate, Surrey (2010).
37. Carlisle, S., Johansen, A., Kunc, M.: Strategic foresight for (coastal) urban tourism market complexity: The case of Bournemouth. Tourism Management, 54, 81-95 (2016).
38. Robinson, S.: Conceptual modeling: who needs it? SCS M&S Magazine, 2010/n2 (April), 1-7 (2010).
39. Davies, M.: Concept mapping, mind mapping and argument mapping: what are the differences and do they matter. Higher Education, 62, 279-301 (2011).
40. Collier, D.: Understanding process tracing. Political Science and Politics, 44 (4), 823-830 (2011).
41. Kung, C.H., Solvberg, A.: Activity Modeling and Behavior Modeling. In: T. Ollie, H. Sol, A. Verrjin-Stuart, Proceedings of the IFIP WG 8.1 working conference on comparative review of information systems design methodologies: improving the practice. Amsterdam, 145–71 (1986).
42. Fernández Güell, J.M., Collado, M.: Ciudades y ciudadanos en 2033: la transformación urbana de España. PricewaterhouseCoopers y Fundación EOI, Madrid (2014).
43. Fernández Güell, J. M., Collado, M., Guzmán-Araña, S., Fernández-Añez, V.: Incorporating a systemic and foresight approach into smart city initiatives: The case of Spanish cities. Journal of Urban Technology, 23 (3), 43-67 (2016).
44. Exceltur: Impactos sociales y económicos sobre los destinos españoles derivados del exponencial aumento del alquiler de viviendas turísticas de corta dirección, impulsado por los nuevos modelos y canales de comercialización P2P. Exceltur, Madrid (2015)
45. Exceltur: 2016 URBANTUR: Monitor de competitividad turística de los destinos urbanos españoles. Exceltur, Madrid (2017).
46. Capeans, J.: Impacto de Airbnb sobre la accesibilidad a la vivienda. El caso de Ciutat Vella, Barcelona. Trabajo Fin de Máster, Universidad Politécnica de Madrid (2017).
47. Ayuntamiento de Madrid: Análisis del impacto de las viviendas de uso turístico en el Distrito Centro. Ayuntamiento de Madrid, Junta Municipal de Distrito Centro, Madrid (2017).
48. Airbnb: El impacto del alojamiento compartido en Madrid. Airbnb, Madrid (2015)
49. Forrester, J.W.: The beginning of system dynamics. The McKinsey Quarterly, 4, 4-16 (1995).

Impacto de la recarga de vehículos eléctricos en la contaminación armónica en las redes eléctricas

Oscar Duque-Perez[1], Angel Luis Zorita-Lamadrid[1], Daniel Morinigo-Sotelo[1], Angel Arranz-Gimon[1], Luis Hernandez-Callejo[2], Rene Romero-Troncoso[3], David Elvira-Ortiz[3]

[1] Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Valladolid (España)
[2] Departamento de Tecnología Electrónica, Universidad de Valladolid (España)
[3] Departamento de Ingeniería Agrícola y Forestal, Universidad de Valladolid (España)
[4] Ca Mecatrónica, Universidad Autónoma de Querétaro (México)

Abstract. El vehículo eléctrico tiene por delante un futuro muy prometedor con una tendencia claramente en aumento, lo que supondrá un impacto significativo sobre las redes de distribución. En este artículo se consideran los aspectos relacionados con la contaminación armónica, teniendo en cuenta los estudios, no muy numerosos, que hasta la fecha se han publicado. Se presenta un caso de estudio en el que se ha registrado la recarga de dos vehículos distintos, y se ha analizado el contenido armónico tanto de la onda de tensión como de intensidad, dando especial énfasis al contenido interarmónico y suprarmónico, aspectos de los que actualmente se empieza a constatar su importancia y que serán un importante objeto de estudio en los próximos años.

Keywords: Vehículo eléctrico, Calidad de Onda, Contaminación armónica.

1 INTRODUCCIÓN

El vehículo eléctrico (VE) ha irrumpido en el escenario energético español como una opción real de movilidad sostenible con una tendencia que se prevé vaya en aumento, y esto tendrá una importante incidencia en las redes de distribución de energía eléctrica desde varios puntos de vista. Aparte de la necesidad de instalar puntos de recarga, quizá el principal problema que se está analizando en mayor profundidad ante la cada vez mayor incorporación del VE es la capacidad de las redes de distribución actuales así como de los centros de transformación que las abastecen. El VE se caracteriza por demandas diarias de baja potencia y larga duración (carga lenta 3,7 kW, 4 a 8 horas) o alta potencia y corta duración (20-120 kW, 30 minutos) cuya incorporación es necesario estudiar. Además, hay que tener en cuenta que la generación cada vez es más variable debido al incremento de la generación distribuida y renovable. Por ello es importante analizar los diferentes escenarios que se pueden plantear con objeto de optimizar las redes actuales, ya que el despliegue de nuevas o ampliación de las existentes implica altos costes de inversión. Hay bastante literatura al respecto con análisis de diferentes escenarios dependiendo del nivel de penetración del VE.

Pero éste no es el único problema que es necesario analizar, la curva de recarga de un vehículo eléctrico con múltiples episodios de variabilidad puede incrementar los problemas de calidad de la energía eléctrica, y lo pueden hacer desde dos ámbitos. Por un lado, los VE son generadores de armónicos, en especial de armónicos de intensidad debido a la electrónica de potencia que utilizan para su carga, y aunque existe mucha experiencia sobre los efectos provocados por equipos aislados, será necesario conocer mejor el comportamiento de decenas de vehículos eléctricos conectados al mismo tiempo a una misma línea de Baja Tensión e incluso ir más allá y analizar la presencia de interarmónicos tal como se trata posteriormente en este trabajo.

Por otro lado, el ruido eléctrico de estas fuentes pueden afectar también las comunicaciones de los contadores eléctricos ya que las compañías están empleando la tecnología PLC, que emplea la red eléctrica de BT para la obtención de las lecturas de dichos contadores.

Es quizá los aspectos relativos a la afección de la calidad de energía eléctrica por parte de la incorporación del VE como una carga habitual los que menos estudios han concitado, siendo importante ir previendo sus consecuencias. En este trabajo se van a mostrar algunos análisis preliminares sobre uno de estos problemas planteados, registrando la carga de dos vehículos eléctricos distintos en dos puntos de carga diferentes analizando el contenido armónico y, especialmente, la presencia de interarmónicos y suprarmónicos en la carga individual de los vehículos medidos.

2 PROBLEMÁTICA DE ARMÓNICOS EN LA RED ELÉCTRICA

2.1 Armónicos

Es de sobra conocida la existencia de armónicos en las redes eléctricas. La proliferación de equipos que incorporan convertidores de potencia ha dado lugar a un tipo de consumo en las redes eléctricas donde la forma de onda se aparta de manera significativa de la forma senoidal. Esta presencia de armónicos tiene varias consecuencias. Desde el punto de vista de las compañías de distribución, la existencia de armónicos de corriente implicará un aumento de la sección de cables, de pérdidas en el cobre, de pérdidas en el hierro, y un aumento también de potencia de los transformadores, todo lo cual supone un coste significativo para dichas empresas. También suponen una reducción de la vida útil de los transformadores de potencia considerándose que el THDi debería limitarse a un valor de 25-30% para tener una esperanza de vida razonable [1]

Pero también para los usuarios, pues el deterioro de la calidad de la onda de tensión puede afectar además a algunos receptores sensibles, se pueden producir sobrecargas y posible resonancia paralelo entre la inductancia de línea y los condensadores de compensación del factor de potencia, disparos intempestivos de protecciones o empeoramiento del factor de potencia.

Además, puede haber perturbaciones en las líneas de comunicaciones y en el funcionamiento de los circuitos de control. De manera más general, pueden aparecer algunos problemas con todo tipo de equipos que utilizan el paso por cero como referencia. De

hecho, si una señal originalmente sinusoidal es lo suficientemente distorsionada, puede cruzar la referencia cero varias veces durante medio período.

La búsqueda de soluciones debe plantearse a dos bandas: Por un lado el usuario debe limitar la cantidad de corrientes armónicas que generan sus receptores y debe procurar distribuir dentro de su planta con baja impedancia por metro de línea. Por otro lado la compañía distribuidora debe garantizar un mínimo de potencia de cortocircuito y debe velar para que los usuarios no superen ciertos límites de distorsión, para que no perjudiquen a sus vecinos que comparten con ellos la red.

Además, hay que tener presente que de momento, a diferencia, por ejemplo, del complemento por consumo excesivo de energía reactiva que supone una penalización en la factura de energía eléctrica, no hay un concepto equivalente que penalice en la factura el consumo de armónicos de corriente, sin embargo, dada la magnitud que empieza a alcanzar este problema, son numerosos los países que tienen en vías de estudio la aplicación de algún tipo de recargo en caso de sobrepasar los límites establecidos por la norma.

El estándar IEEE Std 519 aborda de un modo conjunto diferentes temas como la generación, control y efectos de los armónicos; los métodos de análisis de niveles de armónicos; la medida de tensiones y corrientes armónicas. Establece límites en la distorsión armónica según dos criterios: limitación de la corriente armónica que un usuario puede inyectar en la red de distribución eléctrica y limitación en el nivel de tensión armónica que una compañía de distribución de electricidad puede suministrar al consumidor. Los límites de corrientes armónicas más restrictivos son para los clientes con una carga relativamente grande y para las altas tensiones, para los equipos de generación (armónicos en las tensiones suministradas por las compañías) y para los armónicos pares (sobre todo porque la componente continua puede producir saturación en motores y transformadores) que se limitan a un 25% de los límites recomendados para los menos dañinos armónicos impares. También son más restrictivos los límites para duraciones superiores a una hora: para periodos más cortos los límites suben hasta un 50%. Algún equipo (por ejemplo, fuentes conmutadas) puede ser sensible a la distorsión armónica de corta duración, pero la mayoría de los efectos armónicos tales como el calentamiento de motores son exclusivos de los armónicos de larga duración o repetitivos.

El estándar IEC 61000, norma básica de obligado cumplimiento en la Unión Europea, está compuesto de seis secciones que a su vez se dividen en varias partes; cada una de ellas sobre aspectos concretos de la Compatibilidad Electromagnética. En el estándar IEC 61000 1-4, se exponen las razones para limitar la potencia de las emisiones de corrientes armónicas e interarmónicas conducidas procedentes de equipos en el rango de frecuencias hasta 9 kHz. En IEC 61000 2-1 se clasifican las principales fuentes de armónicos en tres categorías de equipos: equipos de sistemas de potencia, cargas industriales y cargas residenciales. En IEC 61000-2-2 se señalan los niveles de compatibilidad para las perturbaciones conducidas de baja frecuencia y la transmisión de señales en las redes de suministro público en baja tensión. Los niveles de compatibilidad que especifica se aplican al punto de conexión común. El estándar IEC 61000 2-4 indica los niveles de compatibilidad para las perturbaciones conducidas de baja frecuencia y la transmisión de señales en las redes industriales, en función de la clase del entorno electromagnético existente.

La norma IEC 61000-3-2 se refiere a las limitaciones de las emisiones de corrientes armónicas en las redes públicas de baja tensión producidas por equipos con corrientes de entrada inferiores o iguales a 16 A por fase; el IEC 61000-3-4 lo hace para aquéllos con corrientes de entrada superiores a 16 A; el estándar IEC 61000-3-12 para corrientes de entrada mayores de 16 A y menores o iguales a 75 A por fase. Este estándar requiere que los aparatos eléctricos deban probarse para asegurar que cumplen con los requisitos de la norma. El estándar define cuatro clases de forma de onda de acuerdo con los diferentes tipos de equipos; por ejemplo, la clase B se aplica a las herramientas portátiles, mientras que la clase D se refiere a los ordenadores y televisores. Cada clase tiene diferentes límites armónicos, hasta el número 40, que no deben superarse.

La IEC establece un método específico de medida de armónicos e interarmónicos en su estándar IEC 61000-4-7. Este estándar se aplica a la instrumentación destinada a la medida de la respuesta frecuencial de la señal en redes eléctricas para componentes espectrales inferiores a 9 kHz que se superponen a la componente fundamental, diferenciando entre armónicos, interarmónicos y componentes por encima del margen de frecuencias de los armónicos hasta 9 kHz.

No obstante, es importante considerar que estas normativas no se redactaron con el VE como referente sino con otros tipos de cargas como objetivo, como por ejemplo, ordenadores el caso de baja potencia [2].

2.2 Interarmónicos

Se entiende por interarmónico de tensión, y análogamente de corriente, a la tensión o corriente cuya frecuencia está intercalada entre las de los armónicos o, dicho de otra forma, cuya frecuencia no es un múltiplo entero de la frecuencia fundamental.

La magnitud de las componentes interarmónicas en la actualidad es por lo general muy reducida y su medida en presencia de otras componentes armónicas y de la propia componente fundamental puede quedar casi totalmente enmascarada. Sin embargo, el creciente número de equipos de electrónica de consumo conectados a la red cada vez introducen más de estas componentes interarmónicas y en conjunto se van aumentando sus niveles. Por este motivo, y debido a los efectos que producen, está creciendo el interés por su medida y análisis.

Según [3], hay dos mecanismos básicos para la generación de interarmónicos. El primero es la generación de bandas laterales alrededor de la frecuencia fundamental de la tensión de alimentación y de sus armónicos, como resultado de cambios en sus amplitudes y/o ángulos de fase. Estas bandas son causadas por cambios rápidos de corriente en equipos e instalaciones, que también pueden ser una fuente de fluctuaciones de tensión. Estas perturbaciones son generadas por cargas que operan en un estado transitorio, de forma continua u ocasional o, en muchos más casos, cuando se produce una modulación de amplitud. Estas perturbaciones suelen ser aleatorias, dependiendo de los cambios de carga inherentes a los procesos y equipos utilizados. El segundo mecanismo es la conmutación asíncrona (no sincronizada con la frecuencia de la red de alimentación) de los dispositivos semiconductores en convertidores estáticos de potencia. Ejemplos típicos son los cicloconvertidores y los convertidores que usan modulación de an-

chura de pulsos (Pulse Width Modulation, PWM). Los interarmónicos por ellos generados pueden estar situados en cualquier parte del espectro con respecto a los armónicos de la tensión de alimentación. En muchos equipos ambos mecanismos pueden producirse simultáneamente.

Los interarmónicos pueden generarse en cualquier nivel de tensión y pueden transferirse entre niveles diferentes, es decir, los interarmónicos generados en los sistemas de alta tensión y media tensión pueden inyectarse en el sistema de baja tensión y viceversa. Su magnitud rara vez excede del 0,5% de la amplitud del armónico fundamental de la tensión, aunque pueden ocurrir niveles más altos bajo condiciones de resonancia.

En cuanto a los efectos más comunes de la presencia de interarmónicos, cabe destacar las variaciones en la magnitud de la tensión eficaz y el flicker. Además hay que tener en cuenta los efectos térmicos, la interferencia con las señales de control y de protección en las líneas de suministro de energía eléctrica, la influencia en la respuesta de los filtros digitales empleados en la actualidad, las oscilaciones de baja frecuencia en sistemas mecánicos y posibles perturbaciones en el funcionamiento de equipos electrónicos y lámparas fluorescentes…

Es por ello importante tener conocimiento de la posible presencia de interarmónicos donde la existencia del tipo de cargas señalada anteriormente pueda ser importante. El estándar IEC 61000-2 propone el límite del 0,2% de la tensión fundamental como límite de compatibilidad para interarmónicos de cualquier orden en redes de distribución públicas. En el interior de plantas industriales donde existan convertidores, hornos de arco, equipos de soldadura, motores de inducción y otros tipos de cargas fluctuantes, el estándar permite hasta el 2,5% de la tensión fundamental como límite de compatibilidad para interarmónicos hasta el orden undécimo. En cualquier caso, la normativa para la medida de subarmónicos e interarmónicos está por definir; sólo existen algunas recomendaciones en anexos de normas como la IEC 61000-4-7. La medida está basada en la utilización de la FFT con una ventana de muestreo de 10 o 12 ciclos (para redes de 50 o 60 Hz) con una resolución de 5 Hz, lo que no resulta suficiente para localizar con precisión los interarmónicos en la práctica [4].

2.3 Suprarmónicos

El término suprarmónico se refiere a los armónicos en el rango entre 2 y 150 kHz, aunque no sea ésta una definición oficial y se le ha prestado mucha menos atención que al contenido armónico de orden inferior aunque en los últimos años se está empezando a ver su importancia [5]. Normalmente, los analizadores de redes no realizan medidas en este rango de frecuencias [6]. Esta emisión armónica es debida, fundamentalmente, a la frecuencia de conmutación de la electrónica de potencia y puede causar el mal funcionamiento de equipos electrónicos con especial atención a los que incluyen condensadores electrolíticos [7], reducir la vida útil de equipos (especialmente las lámparas LED), fallos en protecciones, sobrecalentamientos [8], y, especialmente, fallos en las comunicaciones, pues están el rango de las comunicaciones PLC (Powerline Communication), pieza importante de las smart grids [5].

3 Armónicos e interarmónicos en la recarga del vehículo eléctrico

Como en este trabajo el principal equipo implicado es el VE, los límites se encuentran referenciados en la norma EN 61851: Electric vehicle conductive charging system - Part 21-1: Electric vehicle on-board charger EMC requirements for conductive connection to an AC/DC supply. Si se considera que el VE está solo conectado a la red de baja tensión a través de una estación monofásica y absorbe una corriente inferior a 16 A, por lo que también se aplica además la norma internacional IEC 61000-3-2 para equipos de Clase A que limita las emisiones de corrientes armónicas para dispositivos como los VE conectados a la red de baja tensión y que absorben menos de 16 A (valor RMS).

La tecnología está avanzando mucho en los últimos años, por lo que los estudios realizados necesitan actualizarse continuamente, no obstante, sí que se observa poca convergencia tecnológica con pocos síntomas estandarización [9]. Diversos estudios se han realizado en los últimos años relacionados con el impacto de la recarga de los vehículos eléctricos en las redes. En especial con lo relacionado con la inyección de armónicos en las mismas. En [10] se identifican cinco tipos genéricos de cargadores, abarcando un rango desde 70 W (bicicleta) a 11 kW de potencia nominal y se presenta un análisis del THDi para el caso de suministro con tensión sinusoidal perfecta y con una onda con un THDv de un 2,2%. EL THDi obtenido es sensiblemente inferior para el caso de suministro con onda distorsionada. Las variaciones globales en el valor del THDi son muy amplias entre unos casos y otros, abarcando desde un valor de 4 a un máximo de 173. En [11] se analizan dos cargas rápidas, una con cargador interno y otra con externo, encontrándose THDi de alrededor de un 20%, con especial incidencia de los armónicos 5º y 7º. En [2] cuatro diferentes tipos de VEs son analizados, utilizando cargadores de 13 y 32 A, encontrando valores individuales del THDi, relativamente bajos, no superando el 12%.

En un estudio realizado en Alemania [8] midiendo la emisión de diecinueve tipos de cargadores distintos se detectó una gran disparidad entre ellos en cuanto a emisión armónica, encontrando valores particularmente altos del tercer armónico con amplitudes en algunos casos superiores al 10%. También se analizó la influencia de la tensión de alimentación, considerando una onda perfectamente sinusoidal y otra más aplanada más acorde con el caso habitual en las redes, observando un aumento del quinto armónico para la alimentación distorsionada mientras que para el caso del tercero y el séptimo esta situación difiere entre unos cargadores y otros. Este estudio se amplió a UK y Finlandia [9] analizando 18 cargadores distintos, 14 con carga monofásica y 4 con trifásica, con un valor medio del THDi del 5,3 % con un rango del 1,7 al 11,9%. Predominan el 3º y 5º armónico con valores que en algunos casos llegan a los 2 A, aunque en general no superan 1 A.

Es necesario tener en cuenta que en general la tasa de carga depende del estado de carga de la batería de forma que la potencia consumida varía significativamente de los momentos iniciales de carga hasta que ésta es completa, variando simultáneamente el THDi de una situación a otra con mayor contaminación armónica en la parte final de la carga (85%) [11], [12]. Así por ejemplo en [13] se detectaron variaciones de 2,3 a 28% a lo largo del ciclo de carga; en [14] un THDi de 59,6% para un consumo de 15,7 A.

En [15] entre un 20 y un 67%, con un valor medio del 5º armónico de un 25% y del 7ª del 17%. El aumento del THDi en la parte final se puede explicar por la disminución de la corriente fundamental demandada en esta fase, lo que implica un aumento de los valores relativos de los armónicos aunque realmente no estén aumentando su valor [9]. Debido a la simetría entre los semiciclos positivo y negativo los armónicos pares son despreciables [1]

También hay que tener en cuenta que el efecto conjunto de diversas cargas simultáneas no es la suma algebraica de los THD individuales pues puede existir cancelación de fase [12], [1]. En [16], se considera este efecto, analizando cómo varía el THDi partiendo de un solo cargador y añadiendo progresivamente más cargas simultáneas a la red, considerando cargadores idénticos y una distribución de probabilidad normal para los diferentes armónicos. En estas condiciones, se determina que el contenido armónico total no aumenta en proporción al número de cargadores, siendo mucho menor que el que correspondería a una simple suma de los mismos. También hay que tener en cuenta que los momentos más probables de recarga serán en horas valle, por lo que en esos periodos habrá menos opciones de cancelación de fase al haber muchas menos cargas conectadas a la red diferentes del VE [10] [17]. No obstante, resultados en [18] muestran que esta cancelación es mayor para el tercer y quinto armónico mientras que para el séptimo la cancelación es mucho menor. También se analiza como para cargadores de similares características prácticamente no existe cancelación. Sin embargo, en [19] se llega a unas conclusiones distintas pues analizando la carga de 19 tipos distintos de cargadores se concluye que existe un potencial de cancelación entre diferentes cargadores considerablemente alto para el quinto y séptimo armónico mientras que para el tercero no se encuentra apenas cancelación, esperando por lo tanto un aumento de dicho armónico y en consecuencia un futuro incremento de las corrientes por el neutro. En [9] se observa una significativa cancelación para el 5º armónico.

En [20] se presenta un caso de estudio realizado en Italia en el que a partir de las medidas realizadas con un vehículo se utiliza la distribución de probabilidad para cada armónico individual para reducir la aleatoriedad de los resultados. En las simulaciones realizadas, para la posible recarga de 150 vehículos en un solo feeder se obtiene un valor de THDv en el punto de conexión que no supone un aumento significativo del existente sin los vehículos. Para un caso de alta penetración, se alcanzan altos valores de THDv que prácticamente llegan al límite permitido si un feeder no está conectado, pero donde especialmente se predicen problemas importantes es cuando una red puede actuar en isla donde los valores THDv exceden claramente los límites permitidos. Hay que tener en cuenta que la magnitud de este fenómeno depende en gran medida de la potencia de cortocircuito en el punto de conexión lo que puede ser un problema significativo en microrredes y redes aisladas [21].

Partiendo del impacto individual recogido en [15], en [19] se analiza el impacto en una smart grid considerando tanto el nivel de baja como de alta tensión, considerando diferentes regímenes de carga utilizando flujo de carga armónico desacoplado, concluyendo que para una alta penetración del VE se tendrán altos niveles de distorsión armónica afectando seriamente al desempeño de las redes de baja, especialmente en el caso de los trasformadores de potencia. Esta misma conclusión se obtiene para el caso de cargas rápidas en horas punta incluso para una baja penetración de VEs.

En el caso de los interarmónicos, aún existe una cierta falta de experiencia y la realización de estudios más profundos en lo que concierne a su producción, no estando muy claro hasta qué punto son realmente un problema [21]. En [22] se utiliza en primer lugar un algoritmo de corrección espectral bimodal para calcular los armónicos, a continuación estos armónicos y el fundamental son filtrados en el dominio de la frecuencia para así detectar los interarmónicos; en el estudio mostrado se detectaron diversos interarmónicos de una amplitud significativa a diversas frecuencias, destacando a 330 y 410 Hz con amplitudes superiores a 1 A.

En [8] se analiza la emisión suprarmónica de diferentes VEs, encontrando diferencias significativas entre ellos y a lo largo del ciclo de carga. En algunos casos, se detectan emisiones muy marcadas ligadas a la frecuencia de conmutación de los cargadores, (10 y 27 kHz en los casos analizados) mientras que en otros casos no se identifica claramente dicha frecuencia de conmutación, debido probablemente a un adecuado filtrado y control que actúe variando la frecuencia. En cualquier caso, se encuentran emisiones en el ancho de banda utilizado en muchos países para aplicaciones PLC.

4 Casos de estudio

Se ha analizado la recarga de dos vehículos eléctricos distintos y en dos puntos diferentes en la provincia de Valladolid, VE1 y VE2. Las medidas se han realizado utilizando un sistema de adquisición de datos (SAD) que ha sido diseñado por investigadores de la Universidad Autónoma de Querétaro que constituyen el grupo HSPdigital (Hardware Signal Processing), con amplia experiencia en el área de procesamiento de señales en hardware, siendo propietarios del mismo. El SAD utilizado en este trabajo es capaz de adquirir datos de siete canales simultáneos a 8000 muestras por segundo con una resolución de 16 bits. El SAD incluye un tarjeta Texas Instruments® convertidor analógico-digital, ADS130E08. A diferencia de equipos convencionales, este SAD permite almacenar todas las formas de onda de las señales de tensión y corriente durante un largo período de tiempo utilizando un dispositivo de memoria portátil, constituido por una tarjeta micro SD estándar.

Las ondas de tensión y de corriente registradas se muestran en la Fig. 1. y Fig.2 respectivamente. En el caso de la corriente es perfectamente observable la distorsión existente en ambos casos, aunque más pronunciado para el VE1.

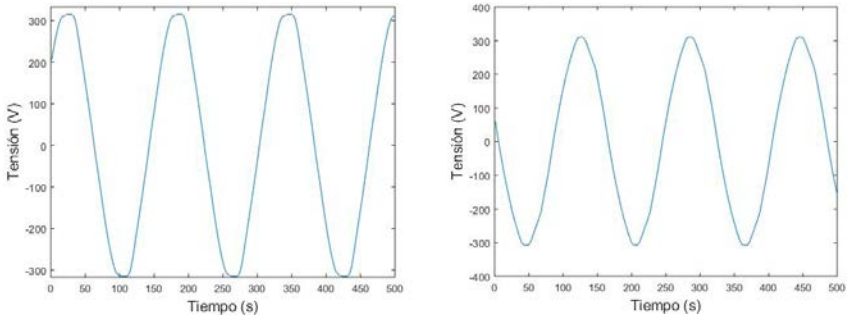


Fig. 1. Ondas de tensión para VE1 (izquierda) y VE2 (derecha).

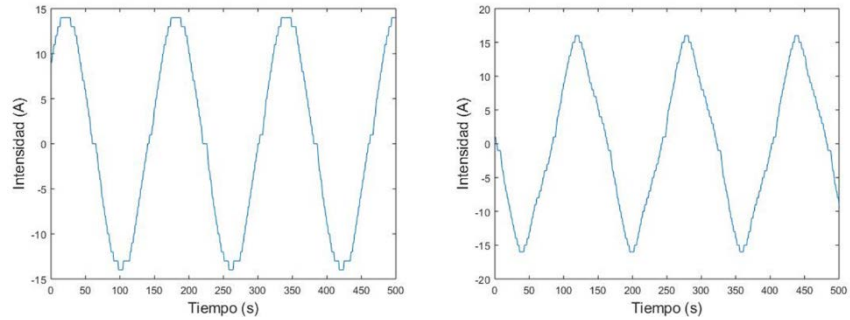


Fig. 2. Ondas de corriente para VE1 (izquierda) y VE2 (derecha).

En las Figs 3 y 4 se muestran la FFT de corriente y tensión para ambos vehículos. Se aprecia una evidente actividad armónica en todos los casos. A continuación se van a tratar con más detalle estos casos.

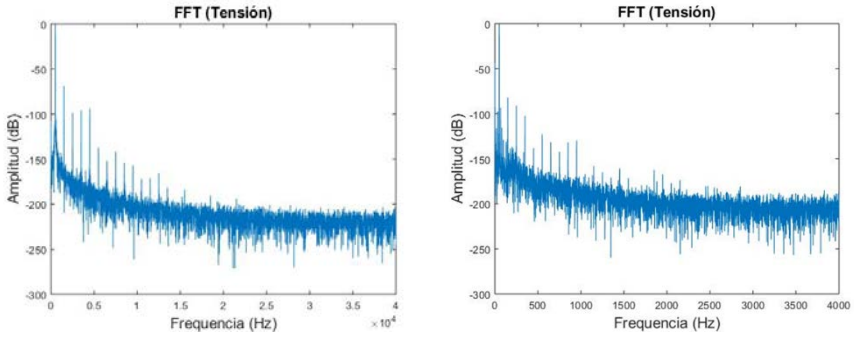


Fig. 3. Espectro de frecuencias (FFT) de tensión para VE1 (izquierda) y VE2 (derecha).

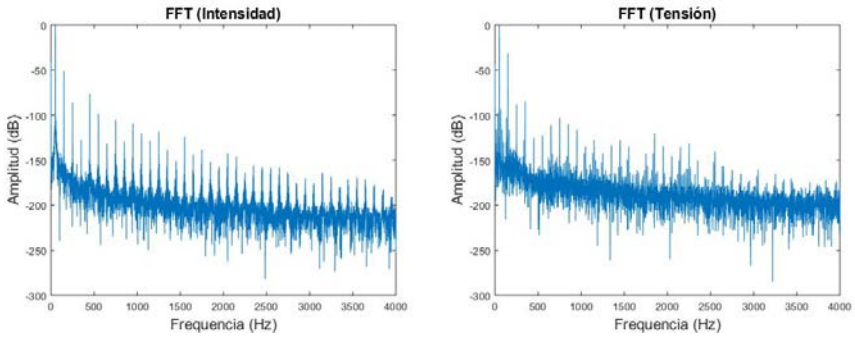


Fig. 4. Espectro de frecuencias (FFT) de corriente para VE1 (izquierda) y VE2 (derecha).

Tabla 1. Análisis contenido armónico en tensión.

	VE1	VE2
THD medio	5,74	4,54
THD máximo	6,21	5,18
Armónico 3º	1,72%	0,90%
Armónico 5º	2,32%	1,64%
Armónico 7º	1,58%	0,59%
Armónico 9º	0,71%	0,32%
Armónico 11º	0,16%	0,77%

Tabla 2. Análisis contenido armónico en corriente.

	VE1	VE2
THD medio	19,97	23,34
THD máximo	21,24	24,45
Armónico 3º	4,62%	10,07%
Armónico 5º	4,25%	1,20%
Armónico 7º	0,25%	1,09%
Armónico 9º	1,86%	0,46%
Armónico 11º	0,88%	0,15%

Desde un punto de vista global, y según norma, se han calculado los valores de las tasas totales de distorsión armónica para todos los casos obteniéndose los valores recogidos en la Tabla 1 para la tensión y en la Tabla 2 para la corriente. Puede observarse como los valores en tensión son ligeramente superiores para el primer VE, sin embargo, los de corriente son superiores para el segundo. No obstante, el THD es un índice que considera a todos los armónicos de la misma forma. Por ello, en dichas tablas también

se recogen los valores individuales (en porcentaje) de los primeros armónicos impares. Mientras que en tensión el reparto es similar entre los dos vehículos, en el caso de la corriente, puede observarse como el tercer armónico es predominante para el VE2 mientas que para el VE1 el 5º es bastante superior al del VE1.

En la Fig. 5 se muestra el contenido armónico en corriente para el VE1 en el rango de 0 a 1000 Hz, donde se puede apreciar que el contenido interarmónico no es muy notorio, no obstante hay que tener en cuenta, que si bien su amplitud no es muy significativa, este contenido está repartido por todo el espectro por lo que alguno de sus efectos perniciosos puede seguir siendo importante a efectos globales. De la misma forma, en la Fig. 6 se muestra el contenido armónico para el VE2.

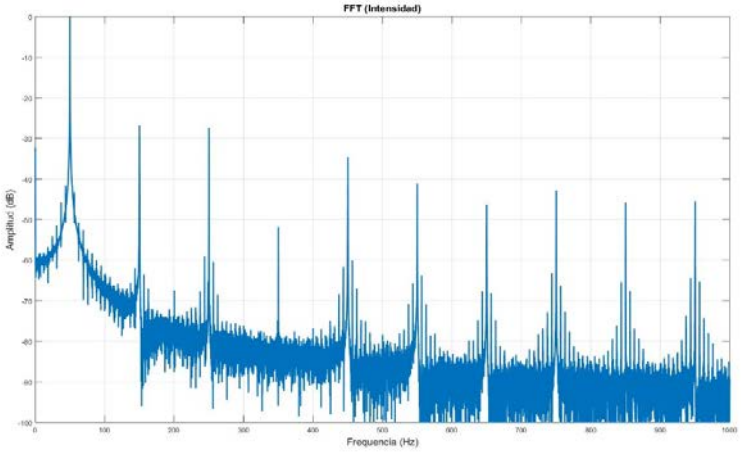


Fig. 5. Contenido interarmónico de corriente para VE1.

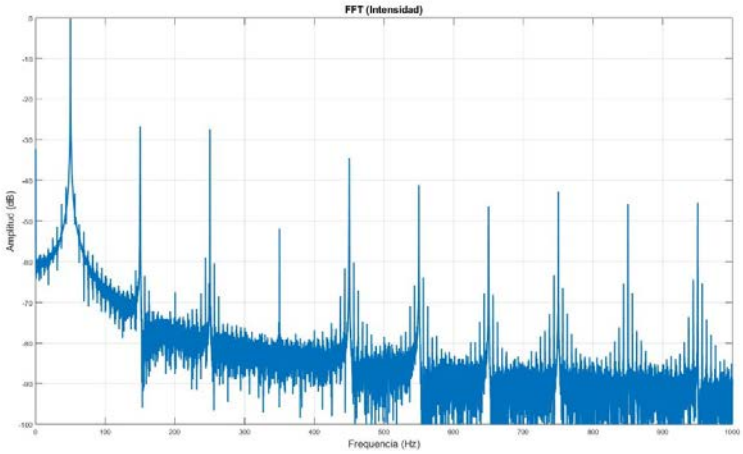


Fig. 6. Contenido interarmónico de corriente para VE2.

En las figuras 7 y 8 se muestra el contenido por encima de los 2 kHz y hasta el valor máximo analizable según las condiciones de medida (4 kHz). Se puede observar como en ambos casos, el contenido no es despreciable. Este análisis sería necesario extenderlo a valores por encima de los 4 kHz para poder analizar con más profundidad posibles interferencias con los sistemas de comunicaciones.

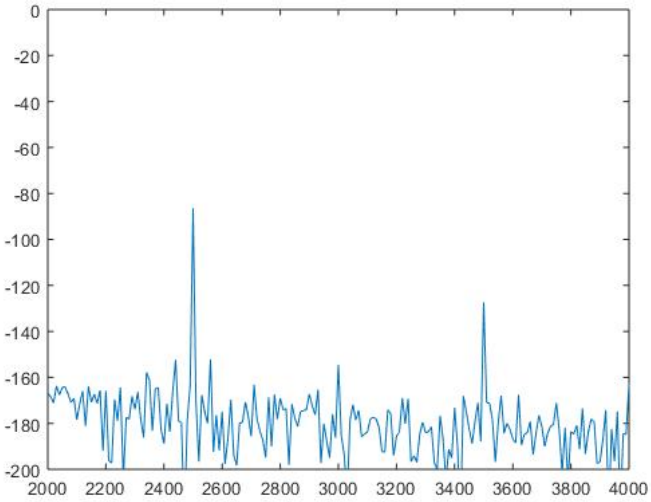


Fig. 7. Contenido suprarmónico de corriente para VE1.

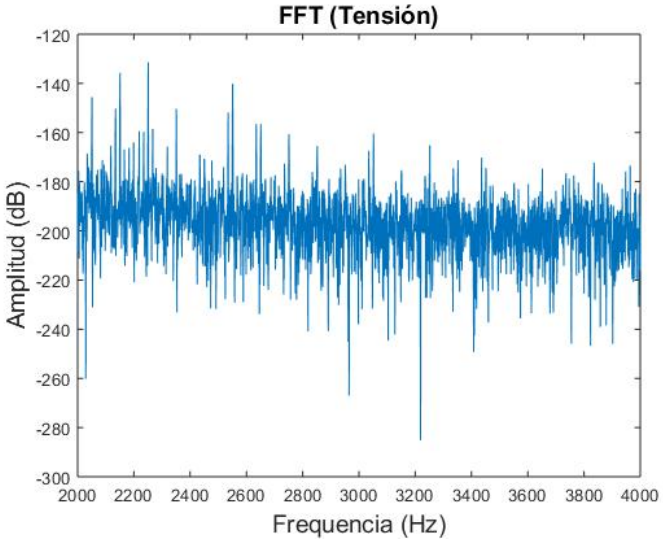


Fig. 8. Contenido suprarmónico de corriente para VE2.

Agradecimientos

EL trabajo ha sido parcialmente financiado con una beca de la Universidad de Valladolid para investigadores visitantes.

Agradecemos a la Fundación Cidaut y al Servicio de Correos de la Universidad de Valladolid por prestar sus instalaciones para realizar las medidas.

Referencias

1. Gómez, J.C., Medhat M.M. .Impact of EV Battery Chargers on the Power Quality of Distribution Systems. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 18, no. 3, July 2003 975.
2. Carter, R., Cruden, A., Roscoe, A., Densley, D., Nicklin, T., Impacts of Harmonic Distortion from Charging Electric Vehicles on Low Voltage Networks (2012 In: Electric Vehicle Symposium 26, 2012-05-06 - 2012-05-09.
3. Hanzelka, Z., Bien, A., Harmonics – interharmonics. Leonardo Power Quality Application Guide – Part 3.3.1, AGH University of Science and Technology, Copper Development Association, IEE Endorsed Provider, 2004.
4. Ke, Z., Xiaorui, H., Jing, J., Kai, L., Research about the Power Consumption Detection Technology of Charger Considering the Harmonic and Unbalanced Current. 2014 IEEE.
5. Martins Mendes, T., Duque, Leandro. C.A., Manso Silva, R., Ferreira, D.D., Ribeiro, P.F., Meyer, J., Grevene, A., Supraharmonic analysis using subsampling. 2018 18th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), Year: 2018, Pages: 1 – 5
6. Kapisch, E. B., Silva, L. R. M. , Cerqueira, A. S. Andrade Filho, L. M. de Duque, C. A. Ribeiro, P. F., A gapless waveform recorder for monitoring Smart Grids, Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 2016 17th International Conference on. IEEE, 2016.
7. Wohlfahrt, T., Waniek, C., Myrzik, J.M.A., Meyer, J., Schegner, P., Supraharmonic disturbances: Lifetime reduction of electronic mass-market equipment by the aging of electrolytic capacitors. 2018 18th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP). Year: 2018. pp. 1 – 6
8. Meyer, S. Mueller, S. Ungethuem. Harmonic and Supraharmonic Emission of On-Board Electric Vehicle Chargers. 2016 IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exposition - Latin America (PES T&D-LA). Morelia, Mexico
9. Collin, A.J., Xu, X., Djokic, Survey of Harmonic Emission of Electrical Vehicle Chargers in the European Market, Survey of Harmonic Emission of Electrical Vehicle Chargers in the European Market. 2016 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion
10. Collin, A.J., Djokic, Tho,as H.F., Modelling of Electric Vehicle Chargers for Power System Analysis. Electrical Power Quality and Utilisation (EPQU), 2011 11th International Conference on
11. Pinto, R.J.C. Pombo, J. Calado M.R.A. Mariano, S. J.P S. An Electric Vehicle Charging Station: Monitoring and Analysis of Power Quality. Compatibility and Power Electronics (CPE), 2015 9th International Conference on
12. Basu, M., Gaughan, K., Coyle, E., Harmonic distortion caused by ev battery chargers in the distribution systems network and its remedy. Dublin Institute of Technology, Ireland. 39th International Universities Power Engineering Conference, 2004. UPEC 2004. Year: 2004, Volume: 2 pp. 869 - 873 vol. 1

13. Lambert, F., Secondary Distribution Impacts of Residential Electric Vehicle Charging, Public Interest Energy Res. (PIER), California Energy Commission, Project no. 373, 1999.
14. Morcos, M.M., Mersman, C.R., Sugavanam, G.D., DiHman, N.M., Battery Chargers for Electric Vehicles, IEEE Power Engineering Review, Nov. 2000, pp. 8-1 1 .
15. Staats, P.T., Grady, W.M., Arapostathis, A., Thallam. R.S., A Statistical Method for Predicting the Net Harmonic Currents Generated by a Concentration of Electric Vehicle Battery Chargers. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12, No. 3, July 1997
16. Yanxia, L., Jiuchun, J., Harmonic Study of Electric Vehicle Chargers. 2005 International Conference on Electrical Machines and Systems Year: 2005, vol. 3 pp. 2404 – 2407.
17. Gong, X., Lin, T., Su, B., Survey on the impact of Electric Vehicles on Power Distribution Grid. Power Engineering and Automation Conference (PEAM), 2011 IEEE
18. Müller, S., Möller, F., Meyer, J., Collin, A.J., Djokic, S.Z, .Characterisation of Harmonic Interactions Between Electric Vehicle Battery Chargers and PV Inverters. Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 2014 IEEE 16th International Conference on
19. Moses, P.S., Deilami, S., Masoum, A.S., Masoum, M.A.S., Power quality of smart grids with Plug-in Electric Vehicles considering battery charging profile.. 2010 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe) 2010 pp. 1 – 7.
20. Gatta, F.M., Geri, A., Lamedica, R., Maccioni, M., Ruvio. A., PQ and Hosting Capacity Issues for EV Charging Systems Penetration in Real MV/LV Networks.. Power Systems Computation Conference (PSCC), 2016.
21. Moschakis, M.N., Karfopoulos, E.L., Zountouridou, E.I., Papathanassiou, S.A., On Adaptation of Electric Vehicle and Microgrid Issues to EMC-Power Quality Standards.. Electrical and Electronic Engineering 2012, 2(5), pp. 249-257.
22. Nie, X., Liu, J., Xuan, L., Liang, H., Pu, S., Wang, Q., Zhou, N., Online Monitoring and integrated Analysis System for EV Charging Station. 2013 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC).

Photovoltaic Water Pumping System for Small Power Conventional AC Pumps

Bruno Tangerino[1,2], Dionízio Roman[1,2], Vicente Leite[1,3], Alessandro Goedtel[2], Ângela Ferreira[1,3], José Batista[1], and Wellington Maidana[1,2]

[1] Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, Campus Santa Apolónia, 5300-253 Portugal
[2] Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Cornlélio Procópio, Paraná, Brasil
[3] Research Centre in Digitalization and Intelligent Robotics (CeDRI)
tangerino.bruno2@hotmail.com; dionizioroman@hotmail.com; avtl@ipb.pt; agoedtel@utfpr.edu.br; apf@ipb.pt; jbatista@ipb.pt; maidana@ipb.pt

Abstract. The interest of photovoltaic (PV) water pumping systems with standard components is increasing as a low cost and independent solution over dedicated systems. However, one of the challenges of this alternative is the fact that small power systems to drive power pumps require a small number of PV modules and the PV string voltage is, usually, not enough to feed the frequency converter. This paper presents an approach to the drive, using a DC/DC converter with maximum power point tracking (MPPT). The overall system has been tested on a real experimental platform.

Keywords: Water Pumping System, Conventional Components, Low Power Pumps, Maximum Power Point Tracking

1 Introduction

The use of photovoltaic energy for water pumping systems is a solution that has been widely researched and implanted [1], [2]. DC motor driven pumps are already in use in several countries, but some problems (mostly maintenance due the presence of commutator and brushes) have made researchers to find other solutions [3].

One of this solutions is a water pumping system equipped with AC motors due to their advantages, mainly their reliability and low cost [2]. However, one problem is the fact that the market is being controlled by few manufacturers able to afford the continuous technology development, causing low spare availability and relatively high prices for dedicated systems [4]. Hence, AC drive systems with fully standard components become attractive [4], [5].

Dedicated PV water pumping systems are formed typically by a power converter, DC motor and PV string for power generation. Low power PV water pumping systems based on standard AC motors are not usual, because a higher

voltage is needed to power the motor, which requires a string with a large number of PV modules. Standard Frequency Converters (SFCs) and AC motors are extensively used in industrial applications and they have been seldom used in PV water pumping systems [4], [5]. The main advantages of this approach in comparison to dedicated systems include manufacturers' independence and better component availability, lower cost because the components are manufactured in large quantities and increased reliability of the system because they are designed to work in industrial environment [5].

SFCs are produced for AC standard voltage of the grid (single or three-phase) and, therefore, needs a minimum voltage level on their DC-link for proper operation. One initial problem is the fact that a large number of PV modules are needed to reach this minimum operating voltage. For small power systems, where the power of the motor is below 1,5 kW, this large number of PV modules implies a high value of surplus power installed. On the other hand, the number of necessary PV modules to generate the rated power of the pump implies a undervoltage value to operate the SFC. Another problem, pointed by Ramos [5], is the lack of maximum power point tracking (MPPT). This paper presents an approach with a DC/DC converter as a solution of these two problems. The proposed solution integrates a step-up converter with MPPT which has been implemented is implemented using a real platform.

2 Photovoltaic Water Pumping System

As demonstrated by Abella [4], a PV array can be directly connected to a SFC to drive an AC pump. The SFC needs a minimum DC-link voltage level to operate in normal conditions. This value varies depending on the type of converter (single-phase or three-phase). Table 1 presents the AC and DC link voltage ranges, for rated power, of the single-phase SFC ACS355. The DC values are, approximately, the peak values of the AC voltage. For lower power (i. e., lower radiation), the DC voltage will also be lower, and, consequently, the speed of the AC motor will be smaller than the rated one, due to scalar control. The system proposed is shown on Figure 1.

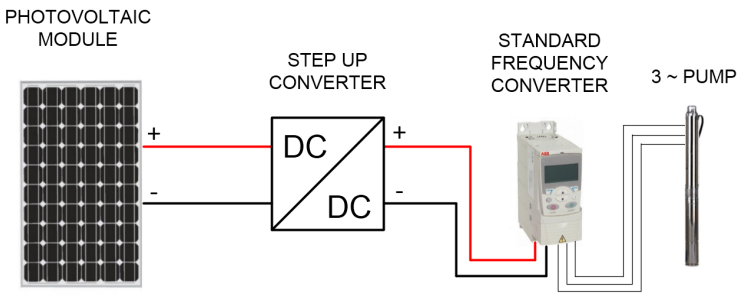


Fig. 1. Configuration of proposed PV water pumping system.

Table 1: Single-phase SFC ACS355.

AC Supply voltage [Min-Max]	200 - 240 V
DC-link voltage (on DC Bus) [Min-Max]	280 - 340 V

For proper functioning, the DC-link voltage obtained from the PV string must attend the minimum value of the SFC and the input voltage must be close to the maximum power point voltage of the PV string [5]. To attend the required voltage at the DC-link of the SFC, a DC/DC step-up converter which rises the voltage level at its output is the proposed solution in this paper. The step-up converter is controlled by a Proportional-Integrative (PI) controller which generates the Pulse-Width Modulation (PWM) pulses. The reference voltage (V_{ref}) is defined by a MPPT algorithm as described later.

For the SFC operation, the so-called PID Macro is utilized for control. This macro, which has a pre-parametrized list of parameters, is available from the manufacturers for closed-loop process control. In this application, the process variable is the DC-link voltage. So, the SFC imposes the DC voltage according to an external reference value (set-point). This reference is set to 300 V. This means that the SFC works with a fixed DC-link voltage and the reference voltage of the PV string is imposed by the step-up converter according to the MPPT algorithm.

To operate in this way, the SFC requires the configuration of a set of parameters, such as the operation method that will be used, analog and digital input and output terminals, acceleration and deceleration times, and mainly the PID parameters: Proportional Gain (K_p), integral time (T_i) and derivative time (T_d) [5].

2.1 Maximum Power Point Tracking

A general issue in PV generation is tracking the maximum power available at the PV string output. The need of an algorithm to track the Maximum Power Point (MPP) comes from the non-linearity of the I-V curve of a PV module. The MPPT technique consists in adjusting the output voltage of the PV string to extract the maximum power independently of any changes in the irradiation or temperature.

In this work, the MPPT method implemented was the P&O algorithm, due to its simplicity and low computational resources [6]. P&O is the most common method of MPPT algorithms, since it is widely used in the control of the power converters in PV applications and does not require any information about the PV modules characteristics to perform the maximum power point tracking [8].

Basically, the P&O algorithm perturbs the voltage and analyses the change on the power value. These perturbations on the voltage are successive steps on the operation point that creates a change in power. If this change is positive, the perturbations are applied on the same direction, otherwise the perturbations are applied on the opposite direction. The steps followed by the algorithm are

illustrated on the flow chart of the Figure 2 with the variables defined in the Table 2.

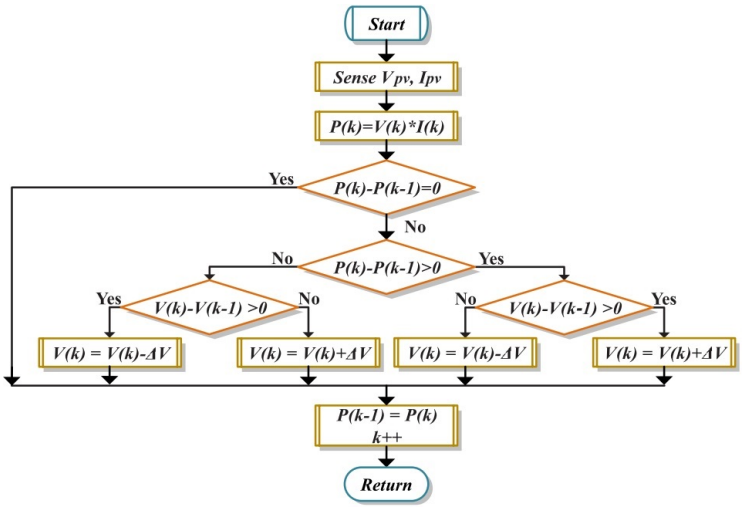


Fig. 2. State flow chart of P&O MPPT algorithm [6].

Table 2: Description of variables presented in flow chart of Figure 2 [6].

Variable	**Description**
V_{pv}	Voltage measured from the PV Panel
I_{pv}	Current measured from the PV Panel
$P(k)$, $V(k)$	Power and Voltage in present iteration
$P(k-1)$, $V(k-1)$	Power and Voltage in past iteration
ΔV	Voltage increment
$k++$	Change for next iteration

The MPPT algorithm generates the reference voltage value (V_{ref}) for the step-up converter. This value is the reference for the PI controller, which reads the actual voltage value of V_{pv}, the reference voltage (given by MPPT algorithm) and generates the pulses of the duty-cycle for the switch of the step-up.

3 Proposed Solution

As an approach to solve the problems referred in previous sections, a DC/DC step-up converter is applied to implement the MPPT and operate the PV string with a large range of voltages.

DC/DC converters are power electronic circuits for power processing that convert a DC voltage value to another level, higher or lower, depending on the converter. There are many types of converters, which are used in large scale in different areas, like UPS, electrical drives, renewable energy systems, DC motor control systems and so on [7]. The step-up converter, or booster converter, is a switching circuit that elevates the value of the input voltage to the output. The electrical scheme of this type of converter is shown on Figure 3.

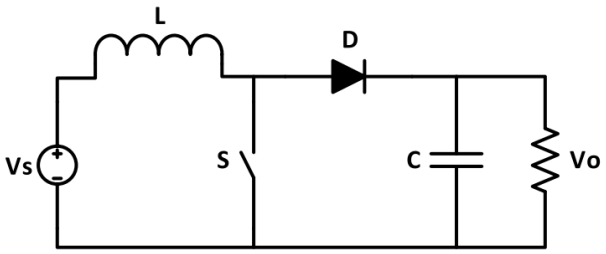


Fig. 3. Step-up converter.

The electric scheme of the proposed PV water pumping system is shown in Figure 4. The step-up is installed between the PV string and the DC-link of the SFC. It is composed by an inductor, a diode and a power switch (IGBT). The block diagram of step-up control with MPPT implemented is shown on Figure 5.

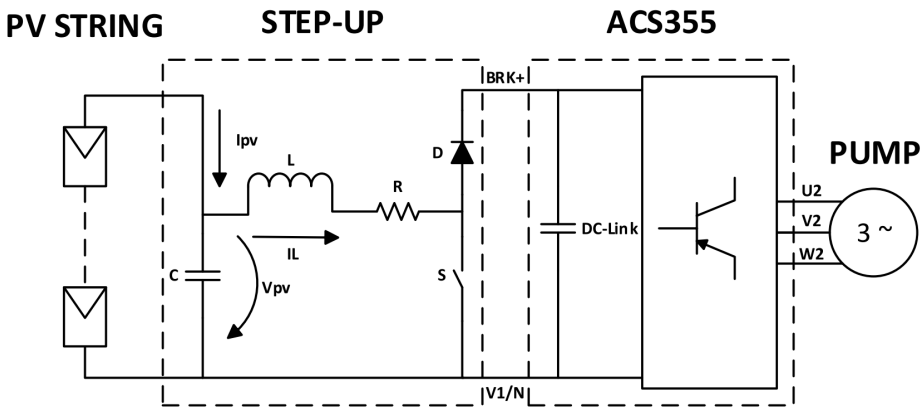


Fig. 4. Proposed PV water pumping system.

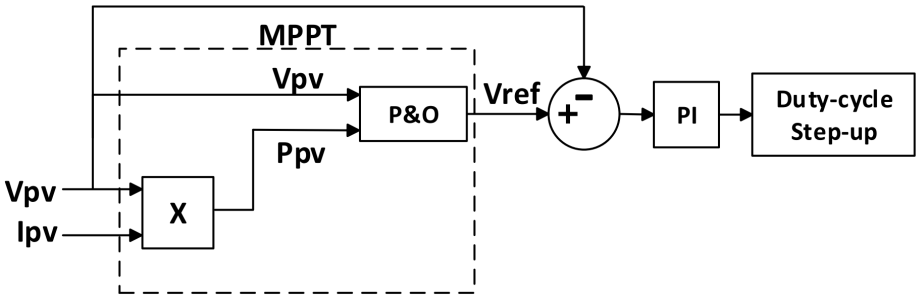


Fig. 5. Step-up control with MPPT.

One challenge is the adjust of the dynamics between the two power stages: the step-up converter and the SFC. The step-up performs the MPPT algorithm with a determined frequency, and the PID macro of the SFC adjusts the speed of the pump to maintain the voltage on the DC-link equal to reference (V_{SP}).

Hence, the PID macro parameters K_p and T_i, acceleration and deceleration times of the SFC, must be adjusted to match the dynamics between these two power stages. According to the tests achieved on the experimental platform, the values of these parameters used in this work are show on Table 3.

Table 3: Experimental parameters of the step-up and SFC.

Parameter	**Value**
Step-up PI Controller	$K_p = 500\text{x}10^{-6}$; $K_i = 0{,}10$
SFC PID Controller	$K_p = 0{,}2$; $T_i = 2$ s; $T_d = 0$
SFC Acceleration time	0.1 s
SFC Deceleration time	0.1 s

3.1 Experimental Platform

To evaluate the functioning and performance of the system proposed in this work, a solar photovoltaic water pumping system at the Polytechnic Institute of Bragança has been used. The system is composed by the elements described on Table 4.

Table 4: Components of the system.

Component	**Description**
Pump	Termar B20 3∼ 1.5 kW - Submersible
Standard Frequency Converter	ABB ACS355-01E-07A5-2
Step-up Power Switch and Diode	Two IGBTs of Mitsubishi PM75RLA120
Step-up Inductor	Mundorf BT140 12 mH/0,45 Ohm
Photovoltaic Modules	Fluitecnik's FTS-220P

The experimental platform components utilized in this work are shown on Figure 6. The PV modules are installed on the roof of the laboratory. The step-up was implemented in Simulink and the real time control was performed using the 1103 controller board from dSPACE.

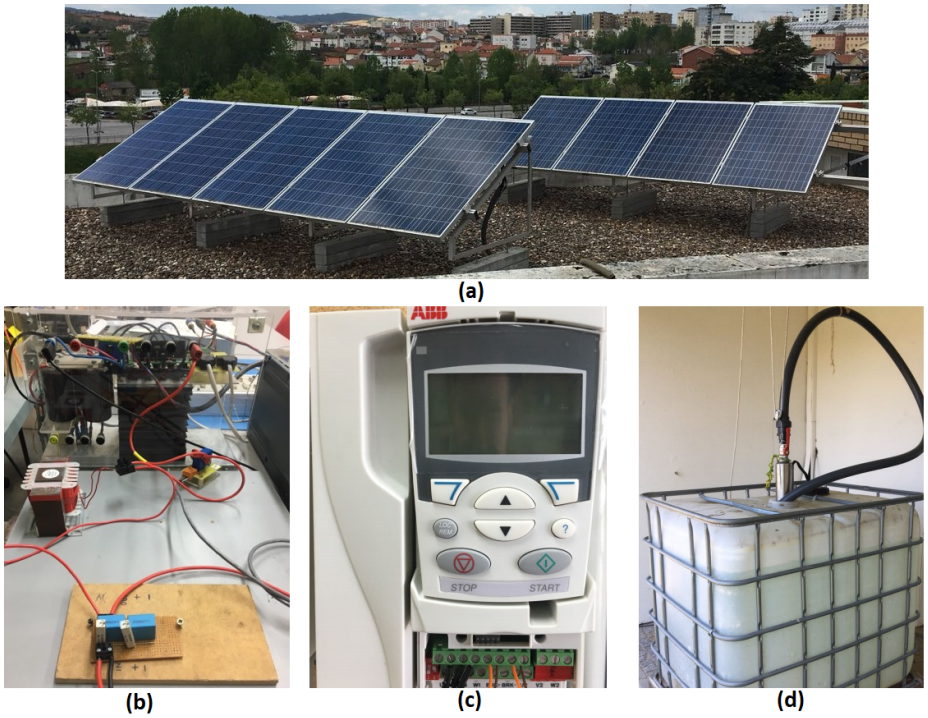


Fig. 6. Experimental platform, (a) PV string, (b) step-up converter, (c) single-phase ACS355, (d) water tank and pump.

The experimental results were carried out with 4, 6 and 8 PV modules available on the roof of the laboratory. All tests were performed under same solar radiation and temperature levels, acquired by the measuring system present on the laboratory. These values are shown on Table 5.

Table 5: Tests conditions.

Condition	**Value**
Radiation level	G = 810 W/m^2
Ambient Temperature	T_a = 28°C
PV Module Temperature	T_{pv} = 45°C

4 Practical Implementation of the System and Evaluation of the Results

Figures 7, 8 and 9 show the V_{pv}, V_{dc}, I_{pv} and P_{pv} curves for 4, 6 and 8 PV modules, respectively. V_{SP} is set 300 V and the MPPT is running two times per second with voltage increment of 1 V.

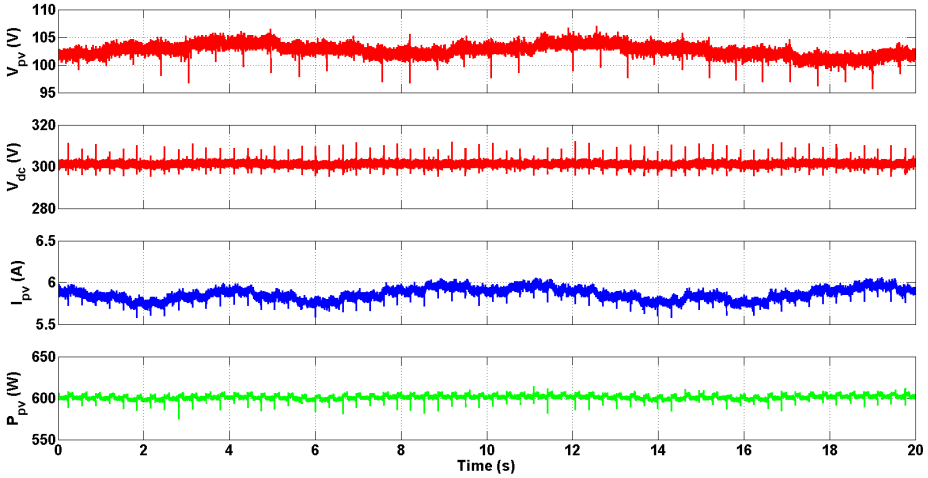


Fig. 7. V_{pv}, V_{dc}, I_{pv} and P_{pv} for 4 PV modules.

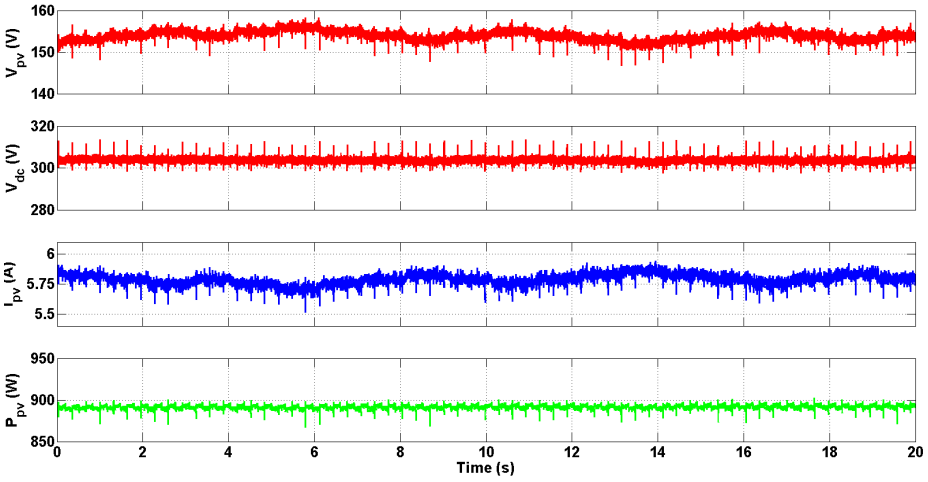


Fig. 8. V_{pv}, V_{dc}, I_{pv} and P_{pv} for 6 PV modules.

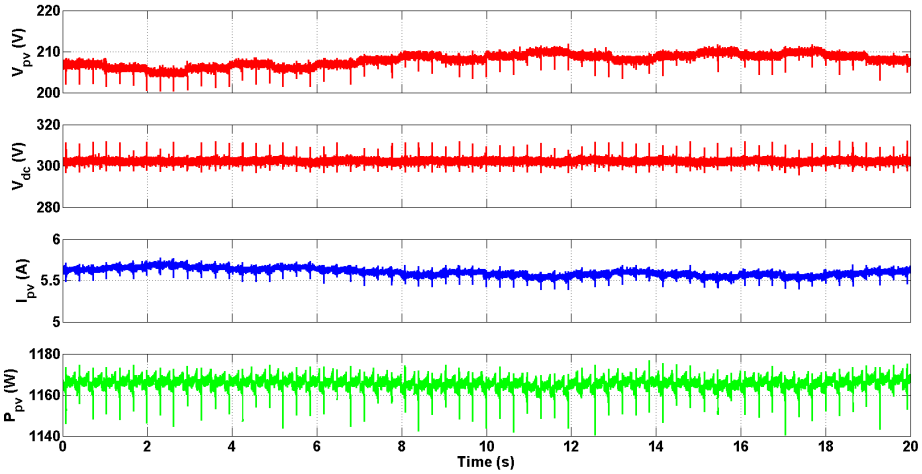


Fig. 9. V_{pv}, V_{dc}, I_{pv} and P_{pv} for 8 PV modules.

For all conditions V_{dc} is 300 V and V_{pv} varies according to the MPPT algorithm, validating the parameters of PID controller of the SFC and the required dynamics between these two power stages. The PV power curve as well as the water pump operation are in agreement with the expected results, showing that the step-up controls the PV string voltage using the MPPT algorithm applying successive steps in order to operate in MPP. The SFC PID macro controls the DC-link voltage indirectly by adjusting the speed of the motor.

These results show that the step-up allows driving low power pumps (up to 1,5 kW) minimizing the necessary number of PV modules. For comparison, Table 6 shows the power and voltage (in MPP) provided by each set of PV modules tested.

Table 6: Comparison of the power and voltage for each set of PV modules.

Size of PV string	**Power and Voltage**
4 PV modules	P = 880 W and V_{pv} = 117 V
6 PV modules	P = 1320 W and V_{pv} = 176 V
8 PV modules	P = 1760 W and V_{pv} = 235 V

From the analysis of the results of Table 6 and Figure 9, with 8 PV modules, it is possible to verify that the power is greater than the 1,5 kW (beyond the necessary) and the PV voltage level is less than the minimum value required from the SFC, i. e., 280 V (Table 1): V_{pv} varies between 200 V - 210 V and V_{dc} is fixed at 300 V for rated operation of the SFC, validating the solution proposed.

5 Conclusions

SFCs can be used in PV pumping applications driven by AC motors. This alternative offers significant advantages compared with those based on PV dedicated controller and pumps. Indeed, SFCs are widely available all over the world at significantly lower costs than those of PV dedicated power inverters. To solve the problem of the number of PV modules on low power systems and the implementation of a MPPT, the addition of a DC/DC converter has been proven to operate as expected. The validity of these proposals have been evaluated experimentally in a real system.

6 Acknowledgements

The authors wish to thank Polytechnic Institute of Bragança, JG Electrical Installations and the Research Center in Digitalization and Intelligent Robotics (CeDRI), for the experimental set-up available.

References

1. Rohit, K. B., Karve, G. M., Khatri: "Solar Water Pumping System", International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, Volume 3, Issue 7, July, 2013.
2. Miladi, M., Abdelghani-Bennani, A. B., Slama-Belkhodja, I., M'Saad, H.: "Improved low cost induction motor control for stand alone solar pumping," 2014 International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb (CISTEM), Tunis, 2014, pp. 1-8.
3. Malla, S. G., Bhende, C. N., Mishra, S.: "Photovoltaic based water pumping system," 2011 International Conference on Energy, Automation and Signal, Bhubaneswar, Odisha, 2011, pp. 1-4.
4. Abella, M. A., Lorenzo, E., Chenlo, F.: "PV Water Pumping Systems based on standard frequency converters", Progress in Photovoltaics Research and Applications 11, 179-191.
5. Fernández-Ramos, J., Narvarte-Fernández, L., Poza-Saura, F.: "Improvement of photovoltaic pumping systems based on standard frequency converters by means of programmable logic controllers", Solar Energy, Volume 84, Issue 1, 2010.
6. Zamora, A. C., Vazquez, G., Sosa, J. M., Martinez-Rodriguez, P. R., Juarez, M. A.: Eciency based comparative analysis of selected classical mppt methods, in 2017 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC), Nov. 2017, pp. 16.
7. Hart, D. W.: Introduction to power electronics, Prentice Hall, 1997.
8. Jiang, J. A., Su, Y. L., Kuo, K. C., Wang, C. H., Liao, M. S., Wang, J. C., Huang, C. K., Chou, C. K., Lee, C. H., Shieh, J. C.: On a hybrid mppt control scheme to improve energy harvesting performance of traditional two-stage inverters used in photovoltaic systems, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 69, pp. 1113 1128, 2017.
9. Narvarte, L. , Poza, F., Lorenzo, E.: "Specification and testing of PV pumps for a Moroccan project". Prog. Photovolt: Res. Appl., 14: 733-741, 2006.

Electric Microgrid in Smart Cities: CEDER-CIEMAT a case study

Luis Hernández-Callejo[1], Miguel Latorre Zubiri[2] y Lilian J. Obregón[1]

[1] University of Valladolid, Campus Universitario Duques de Soria, Soria, Spain. L.H-C: luis.hernandez.callejo@uva.es; L.J.O.: liliancitaobregon@gmail.com
[2] CEDER-CIEMAT, Autovía de Navarra A15 sal. 56, 42290 Lubia (Soria), Spain. M.L.Z: miguel.latorre@ciemat.es

Abstract. The increase in the penetration of renewable generation sources is fundamental in Smart Cities. But these renewable sources can be integrated with distributed electrical storage and intelligence for the management of all assets through electric microgrids. Therefore, these new generation and consumption environments will be present in the Smart City. In this sense, this paper presents one of the most versatile and interesting electric microgrid that exists today, specifically the microgrid of the Center for the Development of Renewable Energies (CEDER) located in Soria (Spain).

Keywords: Electric Microgrid, Smart City, Energy Efficiency, Sustainability.

1 Introduction

As it appears in [1], a *Smart City* (*SC*) is a sustainable urban environment, which tries to provide a high quality of life to its residents, for which it requires an optimal management of resources. Therefore, one of the main challenges of the *SC* will be to carry out an optimal and efficient management of the available resources.

Therefore, it is possible to say that the *SC* is faced with a challenge similar to that of micro-networks, specifically the management of existing assets [2]. In the case of the microgrid, these assets are: *Distributed Generation* (*DG*), distributed electrical storage and loads. These elements also appear in the scenario of the *SC*, so it must face a problem similar to that of the microgrid.

One of the benefits of the electric microgrid is its guarantee of efficiency and sustainability in the global network infrastructure. In this sense, in [3] it is shown how microgrids can be the future of cities in Europe and, therefore, throughout the world.

Other authors [4] focus on the importance of the integration of the electric microgrid in *the* SC in distributed electrical storage. The storage not only seen as support elements to the renewable *DG*, but as an integrating and agglutinating element of the electric vehicle.

The *SC* presents another great challenge, its management. When talking about management, not only must we think about the elements described as members of a microgrid, but also the circulation [5], parking [6-7], infrastructures [8], etc.

In the case of the microgrid, management mainly focuses on distributed resources (generators and storage) [9-10]. This management is independent of whether the microgrid is designed in alternate or continuous [11-12].

What it can affirm is that the electric microgrids will be part of the *SC*, for which the management of those will be their responsibility [13]. This coexistence makes it interesting that there are microgrid test environments, since the integration of these in the *SC* will depend on the degree of control and management of the microgrids.

Numerous are the test scenarios in electric microgrid environments, both real and simulated. However, the authors have selected a special environment in Spain, as it has special conditions in terms of *DG* elements and distributed electrical storage, which makes this environment likes a unique microgrid.

After this introduction the publication is as follows: Section 2 presents the selected microgrid environment; Section 3 lists the objectives that are intended to be covered by this electrical microgrid; and Section 4 ends with some conclusions and future work to be able to develop in this test scenario.

2 Test Scenario: CEDER-CIEMAT

As already mentioned, there are many scenarios in the world based on electric microgrids [14]. Some of these environments are based on simulation, others on emulation, but the vast majorities are real environments.

Without underestimating the simulated and emulated scenarios, it is in the real environments where the validation of the hypotheses takes a decisive character. The transition from simulated/emulated models to the real world is critical and fundamental, since this is where most of the problems or restrictive situations that are overlooked in computational environments appear.

In this sense, this work is centered on a scenario with electric microgrid, which undoubtedly represents one of the most interesting locations found in the literature. Specifically, we are talking about the Center for the Development of Renewable Energies (CEDER) of Lubia (Soria - Spain), created in 1987 as a national center for the research and development of renewable energies. CEDER presents a microgrid on a real scale, and this facility is in Castilla y León, and is owned by the Center for Energy, Environmental and Technological Research (CIEMAT), Public Research Organization, currently under the Ministry of Economy, Industry and Competitiveness.

As will be seen later, CEDER is an ideal environment for the validation and experimentation of the application and integration of *DG*, electrical storage, power electronics and intelligence technologies applied to the operation and control of electric microgrids. All the elements that make up the microgrid (substation, transformers, *DG*, storage, loads, etc.) of CEDER are owned by CIEMAT, allowing any type of maneuver and operation.

Figure 1 shows an area image of the entire CEDER complex. The research center is deployed in some 640 ha, where, as already said, there is a real microgrid, operated and managed in real time, and where the charges and generators are real, and its operation has consequences on the energy flow of the microgrid.



Fig. 1. Aerial image of CEDER. The center is located on 640 ha of land. Courtesy of CEDER.

Figure 2 shows the single-line diagram of the medium voltage grid that CEDER has. In addition, the different existing transformation centers can be identified, which adjust the voltage from 15 kV to 400 V three-phase low voltage. CEDER has a contracted power of 150 kW, and the distribution company supplies electrical power at a voltage level of 45 kV which, through a transformer at the entrance to the center, is conditioned to 15 kV. The input transformer element is 45/15 kV and 1,000 kVA. Next, the center deploys a medium voltage network of about 3 km, interspersing transformation centers to supply low voltage to the consumptions and generators.

All *DG* elements, distributed electrical storage and loads, are connected at low voltage. With regard to demand, the center presents different consumption profiles, which are similar to those that can be found in an industrial environment, in the service sector or even in the domestic sector.

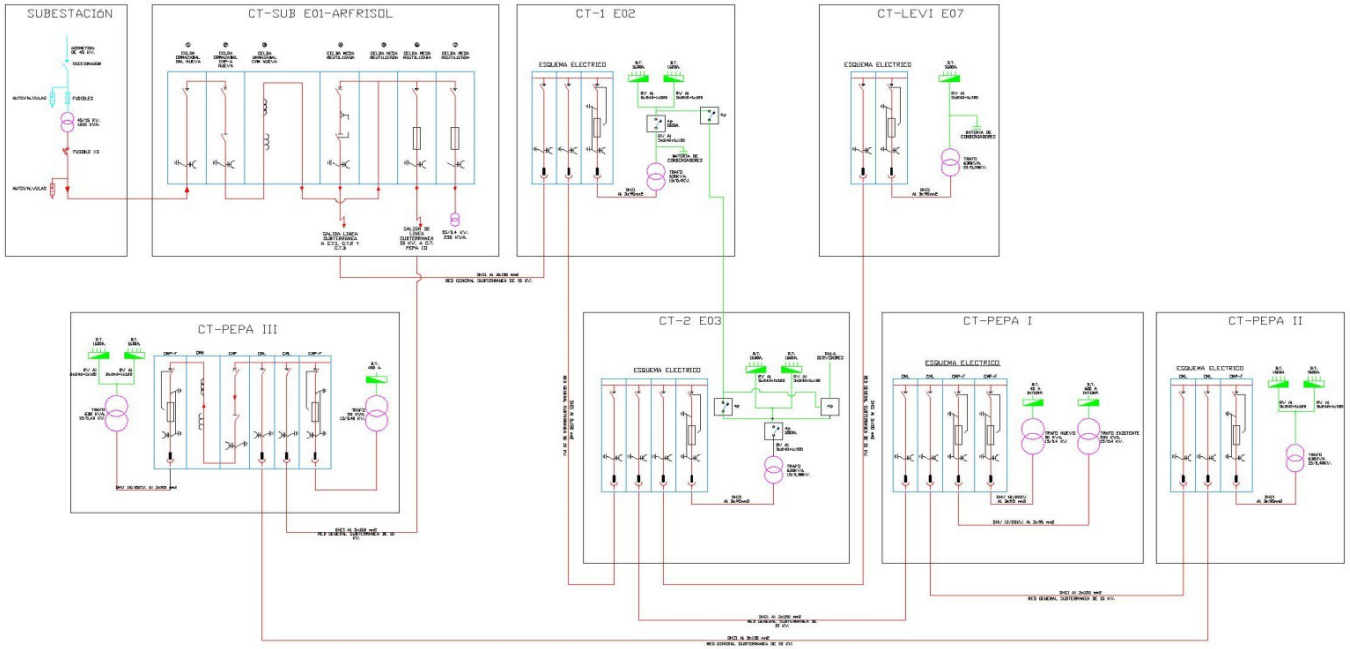


Fig. 2. CEDER single line diagram. Medium voltage at 15 kV and low voltage at 400 V three-phase. You can also see the existing transformation centers. Courtesy of CEDER.

2.1 Elements of *Distributed Generation*

As it could not be otherwise, a microgrid must integrate elements of *DG*, therefore, CEDER presents an interesting variety of these elements, besides being all of them renewable. The electric microgrid installed in CEDER presents the following *DG* elements:

- Wind generation systems: horizontal axis and leeward wind turbine with 50 kW of installed capacity. In addition, it integrates a wind turbine with a horizontal and windward axis of 3.2 kW capacity.
- Photovoltaic generation system: the center integrates 6 photovoltaic systems. The first installation consists of 16 kW distributed in 64 monocrystalline panels of 250 W each, connected to a three-phase inverter of 15 kW. A second roof system consisting of 80 panels of monocrystalline silicon, distributed in 5 arrays connected in parallel, where each array, consists of 16 panels connected in series each, to make a total of 12 kW of power and connected to an inverter three-phase of 10 kW. The third system is another installation on roof of 12.9 kW in 54 monocrystalline photovoltaic panels of two different brands, there are 36 of the brand LDK of 230 W and another 18 of the brand SACLIMA of 240 W, all of them connected to a three-phase inverter of 10 kW in 3 series of 18 panels each. A fourth roof installation of 23 kW is divided into two groups of modules, which form a first series of 84 and another of 154 modules, forming a total of 238 thin-film panels of 97 W per panel, distributed in 17 series of 14 panels each, feeding a three-phase inverter of 20 kW. The fifth installation (14 kW) consists of 3 differentiated structures called park 1, park 2 and park 3, each of the systems inject energy into the network through a single-phase inverter of 5 kW. The sixth installation is on roof, divided into three blocks (one of 48, another of 30 and another of 48 modules), to form a set of 126 polycrys- talline photovoltaic modules of 310 W, connected to 2 three-phase inverters of 20 kW.
- Microcentral hydraulics with Pelton turbine (Figure 3) and three-phase asynchronous generator coupled directly to the impeller of the turbine, with maximum electrical power generated 40 kW. The installation is completed with a bank of capacitor banks to compensate the power factor of the installation. The system is controlled by means of a system of supervision, control and acquisition of its own data, with instructions for active power and regulation through flow through injectors.



Fig. 3. Pelton hydraulic microcentral installation. Courtesy CEDER.

2.2 Distributed Electrical Storage Elements

Achieving a balance in power in a microgrid is necessary. In order to achieve this, it is imperative that the *DG* elements are supported with distributed electrical storage. In this sense, CEDER integrates different storage technologies, which make the center a flexible environment for demand management. The electric microgrid installed in CEDER presents the following elements of distributed electrical storage:

- Mechanical storage: associated to the hydraulic microcentral, the center has a hydraulic pump by means of two centrifugal pumps of 18 kW of power each, which can be managed independently.
- Pb-acid storage: the center also integrates electrochemical storage through three banks of Pb-acid batteries, with capacities of807, 582 and 469 Ah respectively (C_{10}).
- Lithium-ion storage: they also integrate another electrochemical storage technology, specifically a lithium-ion battery with a capacity of 2 x 50 Ah. Figure 4 shows the Li-ion battery bank and its corresponding bi-directional inverter.



Fig. 4. Lithium-ion battery and bi-directional inverter. Courtesy CEDER.

2.3 Existing Demand

A microgrid must be completed with charges, which will request energy to perform its functions (motors, lighting, boilers, laboratories, etc.). To guarantee the supply of said loads, or at least of the priority ones, will be the responsibility of the manager of the microgrid.

In this sense, CEDER has loads that must be fed. In addition, these loads are what allow the day to day operation of the center, or in other words, the different buildings that make up the center are those that demand energy for its operation.

In addition, these real charges have different consumption patterns, so some facilities behave as an industrial environment, while others do so as a domestic consumer or the service sector. In this way, the microgrid has different consumption profiles, which will allow different adjustments to generation and storage, based on the varied behavior of the existing demand.

3 Monitoring of Microgrid

The control center of CEDER is in charge of monitoring the entire microgrid. All the loads (buildings and installations) of CEDER are connected to this centralized manager by means of ethernet technology, so that the data can be sent and received at any point of the center, to be processed in a decentralized way later. The monitoring also reaches the *DG* elements and distributed electrical storage.

To fulfill this purpose of monitoring, CEDER has a total of 53 single-phase and three-phase smart meters, and 9 data concentrators to record the measurements taken by them. Each transformation center integrates a data concetrator, and those with a

double transformer incorporate a second data concentrator, in master-slave configuration. Smart meters obtain current and voltage data, active power, reactive power in the four quadrants, bidirectional active energy, reactive energy in the four quadrants and instantaneous power factor. All mentioned devices incorporate communications technology through *PoweRline Intelligent Metering Evolution* (*PRIME*). Figure 5 shows a display of three-phase smart meters and a data concentrator of a transformation center.

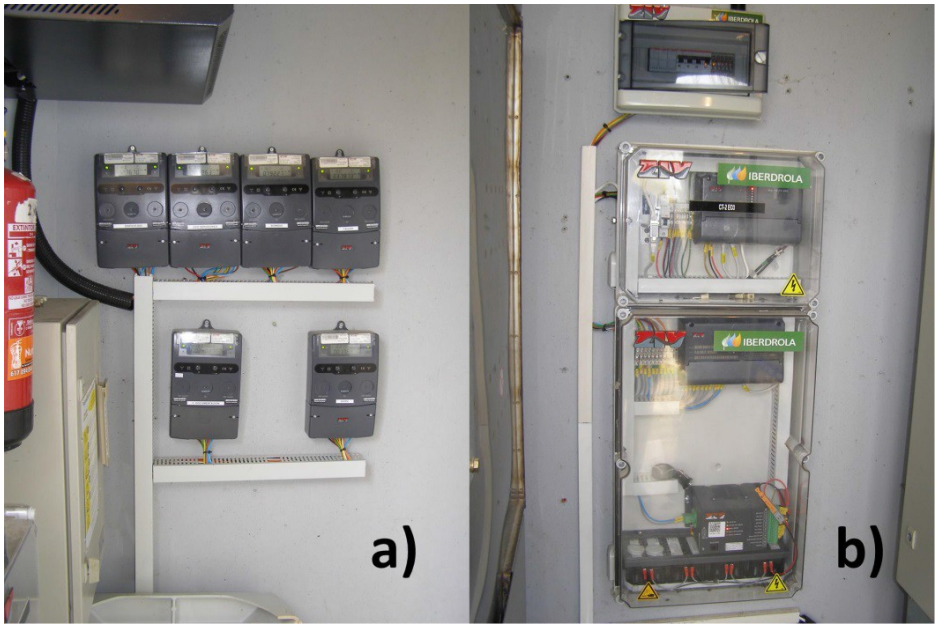


Fig. 5. a) Smart meters for the measurement of consumption and *DG*; b) Data concentrator in transformation center to monitor smart meters in low voltage.

4 Objectives of the CEDER-CIEMAT Electric Microrgrid

The main objective of the micro-network of CEDER is to approach the energy sustainability. For this, it is essential to integrate sources of renewable generation, small-scale and as *DG*, and in this way reduce the dependence on foreign energy.

In addition, the communications displayed in CEDER allow achieving clear objectives, namely:

- Monitoring: thanks to the advanced measurement it is possible to monitor the network topography, as well as its evolution over time through web services and specific software. In addition, it is possible to analyze the evolution of the different roles of the devices that make up the measure (smart meter and data concentrator), availability of the network, availability of smart meters, registered/deregistered devices and operation of the protocol *PRIME*.

- Intelligent measurement and management: the data coming from the measure are sent daily through scheduled tasks through web services implemented in the data concentrators. In this way, the data concentrators interrogate the smart meters of their subnet to obtain the specified information. The information is sent, in xml files, via FTP to the control center, where they are stored in databases. This information can be used for multiple offline processes: verification of simulations, training of models for predicting electricity demand or renewable generation, design of consumption and generation patterns, etc.
- Demand management: by comparing the tariff and electricity bills of CEDER with simulated tariffs and load profiles, it is possible to design behavior patterns with the objective of reducing costs and improving energy efficiency. Figure 6 shows the measurement of different buildings of the CEDER.
- Quality of service (noise and interference): from a communication perspective, in an electrical microgrid a reliable means of communication is necessary for proper data management. In this case, the electrical cable can be affected by interferences, which can cause alterations in the configuration of the network, as well as loss of data and the impossibility of controlling remote devices.



Fig. 6. a) Daily smart meters data collected

5 Conclusions and Future Jobs

The integration of renewable generation sources is a reality today. The integration is present in all the levels: transport and distribution in the electrical grids, and in the *SC*. In addition, the *SC* is also an integrator of the new paradigm that supposes the electric microgrid, being this in turn a *DG* integrator (renewable or not), distributed electrical storage and intelligence.

In this sense, the existence of demonstration environments and technology validators are crucial in the technological development. Electric microgrids position themselves as integrating spaces of different technologies, and of very different areas (energy, communications, systems, social, etc.).

This work has presented the electric microgrid of CEDER, located in Soria (Spain), which can be considered one of the most complete of the real microgrids in the world, mainly due to its great variety of *DG* and storage technologies.

Based on a very efficient and robust communications and monitoring layer, CEDER's microgrid effectively manages all its assets under its responsibility. In addition, this demonstration environment allows the addition of any other *DG* or storage element, since the CEDER dimensions allow it.

CEDER is presented as a perfect test scenario for the validation of electric microgrid technologies. The multiple possibilities that this environment allows, positions this microgrid as one of the most interesting in the world.

Acknowledgent

The authors thank the CYTED Thematic Network "CIUDADES INTELIGENTES TOTALMENTE INTEGRALES, EFICIENTES Y SOSTENIBLES (CITIES)" nº 518RT0558.

References

1. Calvillo, C.F., Sánchez-Miralles, A., Villar, J.: Energy management and planning in smart cities. Renewable and Sustanaible Energy Reviews 55(March), 273-287 (2016).
2. Hernández-Callejo, L., Mirez, J., Horn, M., Bonilla, L.M.: Simulation of Direct Current Microgrid and Study of Power and Battery Charge/Discharge Management. Dyna 92(November), 673-679 (2017).
3. Schmitt, L., Kumar, J., Sun, D., Kayal, S., Mani Venkata, S.S.: Ecocity Upon a Hill: Microgrids and the Future of the Europeai City. IEEE Power and Energy Magazine 11(4), 59-70 (2013).
4. Coelho, V.N., Coelho, I.M., Coelho, B.N., de Oliveira, G.C., Barbosa, A.C., Pereira, L., de Freitas, A., Santos, H.G., Ochi, L.S., Guimaraes, F.G.: A communitarian microgrid storage planning system inside the scope of a smart city. Applied Energy 201(September), 371-381 (2017).

5. Mwasilu, F., Justo, J.J., Kim, E-K., Do, T.D., Jung, J-W.: Electric vehicles and smart grid interaction: A review on vehicle to grid and renewable energy sources integration. Renewable and Sustanaible Energy Reviews 34(June), 501-516 (2014).
6. Giuffre, T., Siniscalchi, S.M., Tesoriere, G.: A Novel Architecture of Parking Management for Smart Cities. Procedia – Social and Behavioral Sciences 53(October), 16-28 (2012).
7. Barone, R.E., Giuffre, T., Siniscalchi, S.M., Morgano, M.A., Tesoriere, G.: Architecture for parking management in Smart cities. IET Intelligent Transport Systems 8(5), 445-452 (2014).
8. Al-Hader, M., Rodzi, A.: The Smart City Infrastructure Development & Monitoring. Theoretical and Empirical Researches in Urban Management 4(2), 87-94 (2009).
9. Katiraei, F., Iravani, M.R.: Power Management Strategies for a Microgrid With Multiple Distributed Generation Units. IEEE Transactions on Power Systems 21(4), 1821-1831 (2006).
10. Zhou, H., Bhattacharya, T., Tran, D., Terence, T.S., Khambadkone, A.M.: Composite Energy Storage Involving Battery and Ultracapacitor With Dynamic Energy Management in Microgrid Applications. IEEE Transactions on Power Electronics 26(3), 923-930 (2011).
11. Chen, Y-K., Wu, Y-Ch., Song, Ch-Ch., Chen, Y-S.: Design and Implementation of Energy Management System With Fuzzy Control for DC Microgrid Systems. IEEE Transactions on Power Electronics 28(4), 1563-1570 (2013).
12. Nejabatkhah, F., Li, Y.W.: Overview of Power Management Strategies of Hybrid AC/DC Microgrid. IEEE Transactions on Power Electronics 30(12), 7072-7089 (2015).
13. Hernández, L., Baladrón, C., Aguiar, J.M., Calavia, L., Carro, B., Sánchez-Esguevillas, A., Cook, D.J., Chinarro, D., Gómez, J.: A study of the relationship between weather variables and Electric power demand inside a Smart grid/Smart world framework. Sensors 12(9), 11571-11591 (2012).
14. Hernández, L.: Microrredes Eléctricas: Integración de generación renovable distribuida, almacenamiento distribuido e inteligencia. Garceta Grupo Editorial:2018.

Smart Island: Tecnología Power-to-Gas para una isla de Gran Canaria 100% renovable

Manuel Bailera[1], Alejandro García[1], Pilar Lisbona[2] and Luis M. Romeo[1]

[1] Escuela de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de Zaragoza, María de Luna, 3, 5018, Zaragoza Spain
[2] Escuela de Ingeniería de la Industria Forestal, Agronómica y de la Bioenergía, Universidad de Valladolid, Campus Duques de Soria, 42004, Soria Spain
mbailera@unizar.es

Resumen. El actual sistema de generación eléctrica de la isla de Gran Canaria se caracteriza por ser un sistema pequeño, poco eficiente, aislado y por estar constituido principalmente por tecnología sustentada en combustibles fósiles. Esta situación conlleva un elevado coste de generación eléctrica así como un elevado nivel de emisiones específicas. Con la finalidad de conseguir un sistema eléctrico más favorable técnica, económica y medioambientalmente se dimensiona un sistema de generación 100% renovable. Se proponen cuatro posibles modelos de entre los que se selecciona uno basado en generación eólica y fotovoltaica. Este sistema implementa un sistema Power to Gas que permite adaptar la generación a la demanda requerida por el sistema, además de considerar limitar la potencia del sistema Power to Gas. Finalmente la alternativa proyectada resulta ser una opción más rentable y sostenible que el sistema de generación actual.

Keywords: Smart island, Energy system, Power to Gas.

1 Introducción

Las Islas Canarias cuentan hoy en día con uno de los sistemas eléctricos menos descarbonizados de Europa. Su parque de generación eléctrica actual es la consolidación de un modelo proyectado hace varias décadas cuando las energías renovables no estaban desarrolladas. Este modelo se proyectó bajo la necesidad de abastecer sistemas aislados y de reducido tamaño en el que se necesitaban tecnologías capaces de adecuarse a la demanda del sistema en pequeños intervalos de tiempo. Por ello, se optó por instalar grupos de reducida potencia, arranque rápido y capacidad de variación de carga. Dicho modelo es capaz de cubrir la demanda pero presenta baja eficiencia, alta dependencia energética (importación de petróleo), elevados costes de generación e inestabilidad de precios [1,2].

En el escenario actual de cambio climático el principal gas de efecto invernadero es el dióxido de carbono (CO_2), producido por el uso de combustibles fósiles para la obtención de energía. Según el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC), la Humanidad no puede emitir más de 1.000 Gt de CO_2 a partir de ahora, si

queremos evitar que la temperatura media mundial se eleve a más de 1,5 o 2 °C: si proyectamos el ritmo actual de consumo, habremos emitido la totalidad de este carbono para el 2040. Por ello se han propuesto objetivos de reducción de emisiones a nivel internacional como se refleja en el Protocolo de Kioto o en las directivas de la Unión Europea [3,4].

Canarias al ser una región con un modelo energético basado principalmente en combustibles fósiles ha sido objeto de numerosos estudios por parte de diversas instituciones. Uno de los estudios realizados fue elaborado por Greenpeace [5]. Sus resultados demostraban la existencia de potencial renovable suficiente para cubrir la demanda energética de Canarias y la viabilidad económica del modelo planteado. Otras instituciones que han analizado la situación energética de Canarias han sido el Centro Atlántico de Pensamiento [6], el Gobierno de Canarias [1] o el Cabildo de Gran Canaria, para la isla de Gran Canaria [7], las cuales han planteado alternativas al actual modelo de generación basándose en el potencial energético de las islas y llegando a la conclusión de que mantener este sistema energético en el sistema insular no es viable a largo plazo. Por ello se plantea la necesidad de dimensionar un sistema eléctrico para Gran Canaria sostenible tanto ambiental como económicamente, en el que se ponga en valor el elevado potencial renovable de la isla.

1.1 El sistema eléctrico en cifras

El sistema eléctrico canario cuenta con seis subsistemas eléctricamente aislados y de pequeño tamaño comparados con el peninsular. En el momento actual y a corto plazo no está prevista la interconexión entre islas debido a las grandes profundidades marinas que impiden el tendido de cables submarinos. Cabe destacar la situación de las islas de Lanzarote y Fuerteventura, que sí están interconectadas.

Los sistemas eléctricos de mayor dimensión en Canarias, corresponden a las islas capitalinas y al compartido por las islas de Lanzarote y Fuerteventura. Los tres restantes son de escala reducida y corresponden a La Palma, La Gomera y El Hierro.

En el sistema actual la penetración de las energías renovables ha sido muy paulatina y meramente testimonial. El retraso del Archipiélago en la implantación de renovables es notable, en el año 2.015 de los 3.059 MW de potencia instalada solo el 11,2 % de la potencia instalada era renovable mientras que en la Península era del 37,3% [1]. Además, un gran número de centrales térmicas utilizan productos derivados del petróleo, fuel y gasoil, que poseen mayores emisiones específicas que el gas natural o el carbón (Tabla 1). Actualmente existe voluntad por parte de las Administración Pública de Canarias para aumentar la generación eléctrica proveniente de fuentes de energía renovables [8]. Un ejemplo es el Plan Energético de Canarias, PECAN, que contempla importantes aumentos de potencia renovables en las islas. Por otro lado podemos afirmar que la realidad ha diferido de notablemente de los objetivos propuestos hace 5-10 años, pues se ha instalado potencia renovable pero en menor medida de lo esperado.

El consumo per cápita se situó en 4.126 kWh por habitante, quedando por debajo de la media nacional (5.639 kWh/hab). No obstante, el coste medio de generación del MWh fue de 191,93 € [1], un 271% más elevado que el del sistema peninsular. Asi-

mismo, las emisiones de CO_2 asociadas a la generación eléctrica supusieron 6.244,19 kg de CO_2-eq por habitante [1].

Tabla 1. Potencia eléctrica instalada [MW] en las Islas Canarias en el año 2.015. Fuente:[1].

	Gran Canaria	Tenerife	Lanzarote	Fuerteventura	La Palma	La Gome-ra	El Hierro	Total
Generación fósil								
Turbina de Vapor	304,2	265,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	570,1
Turbina de Gas	173,5	302,7	62,5	79,1	22,5	0,0	0,0	604,3
Ciclo combinado	461,7	456,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	918,5
Motor Diésel	84,7	86,2	169,8	107,9	82,8	22,6	14,9	568,9
Total	1.024,1	1.111,6	232,3	187,0	105,3	22,6	4,9	2.697,8
Generación renovable								
Eólica	86,7	36,7	8,8	13,1	7,0	0,4	0,0	152,6
Fotovoltaica	39,6	114,9	7,8	13,0	4,6	0,0	0,0	179,9
Minihidráulica	0,0	1,2	0,0	0,0	0,8	0,0	0,0	2,0
Hidroeólica	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	22,8	22,8
Biogás	0,0	1,6	2,1	0,0	0,0	0,0	0,0	3,7
Total	126,3	154,4	18,6	26,1	12,4	0,4	2,9	361,1
Total	**1.150,4**	**1.266,0**	**250,9**	**213,2**	**117,7**	**23,0**	**37,8**	**3.059,0**

1.2 Gran Canaria 100% renovable

Se pretende dimensionar un sistema eléctrico aislado con tecnología renovable y de tamaño representativo, por ello de las islas que componen el archipiélago canario se elige Gran Canaria. Su población es de 843 mil personas lo que supone el 40% de la población del conjunto insular. La demanda eléctrica de Gran Canaria se caracteriza por su estabilidad a lo largo del año (ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), gracias al clima benigno de la isla con temperaturas suaves durante todo el año. La mayor afluencia de turistas en los meses estivales hace que exista un leve incremento de la demanda eléctrica en dicho periodo.

El hecho de tratarse de un sistema aislado, no interconectado, conlleva una menor estabilidad y seguridad en el sistema, debido a la imposibilidad de redirigir los flujos de potencia en caso de apertura de líneas, provocando cortes en el suministro. Por tanto, este aislamiento obliga a mantener una mayor capacidad de generación eléctrica para asegurar adecuadamente el suministro.

Por otro lado, el escaso volumen de demanda de los sistemas energéticos insulares, en comparación con el peninsular, hace complicado el aprovechamiento de las economías de escala lo que conlleva mayores costes de inversión y de explotación. El objetivo del presente proyecto es diseñar y dimensionar un sistema eléctrico 100% renovable para la isla de Gran Canaria. El potencial de fuentes de energía renovables de Gran Canaria es elevado, siendo las energías predominantes en la isla las siguientes tecnologías.

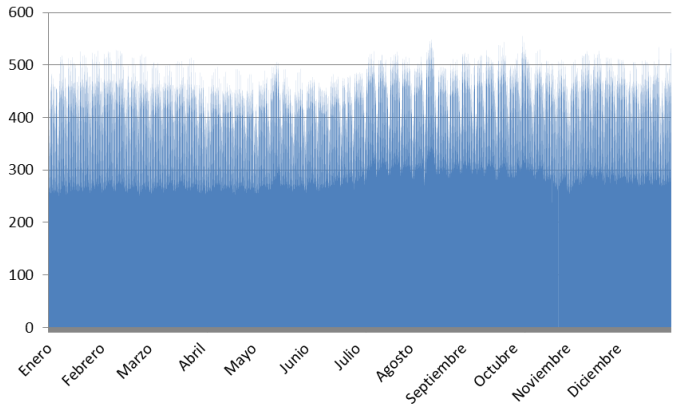


Fig. 1. Demanda eléctrica de Gran Canaria en el año 2.015 [MW].

En primer lugar, la energía eólica con un elevado potencial tanto en la modalidad on shore como off shore. Un estudio reciente de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria (ULPGC) asegura que solo con eólica off shore se podría abastecer 22 veces el consumo eléctrico de la isla. El recurso eólico de la isla es elevado, superior al de otras regiones asegurando la rentabilidad de esta tecnología. La energía solar, al igual que la eólica, tiene un alto potencial en la isla, pues presenta un número elevado de horas de Sol al año y a una radiación alta.

Además de las tecnologías renovables de generación es necesario instalar sistemas de almacenamiento capaces de trasladar la energía generada y no demandada por el sistema a momentos en los que la generación es inferior a la demanda. El sistema de almacenamiento adecuado para la isla de Gran Canaria debe presentar gran potencia de transformación para adaptarse a las fluctuaciones de la generación renovable. Por ello el sistema de almacenamiento elegido es el Power to Gas. Esta tecnología se compone de electrolizadores que transforman los excedentes de electricidad en hidrógeno. Posteriormente se transforma este hidrógeno junto con dióxido de carbono en metano mediante un proceso de metanización. De esta forma se obtiene metano que es almacenado. El metano obtenido se transforma en electricidad mediante ciclo combinado en las situaciones donde la generación es inferior a la demanda. Es cierto que esta tecnología, Power to Gas, no presenta altos rendimientos pero permite grandes almacenamientos de energía durante largos periodos de tiempo. Para dimensionar el sistema eléctrico de la isla se van a desarrollar los siguientes puntos: (i) Caracterizar la demanda eléctrica de la isla. Para ello se recurrirá a las bases de datos de Red Eléctrica de España, (ii) evaluar las fuentes de energía renovable idóneas para Gran Canaria y la potencia a instalar. Asimismo, cuantificar la generación asociada a las misma, (iii) cuantificar la eficiencia energética de un sistema de metanización catalítica. Posteriormente, dimensionar el sistema de almacenamiento Power to Gas necesario, en base a dicha eficiencia, al tamaño del parque de generación y a la demanda en cada periodo y (iv) evaluar técnica y económicamente diferentes configuraciones de potencia eólica, fotovoltaica y PtG para determinar cuál presenta mejores resultados.

2 Diseño y simulación de un sistema Power to Gas de metanización catalítica

Un parque de generación 100% renovable necesita ser gestionado adecuadamente para casar demanda y producción. Las tecnologías de almacenamiento energético permiten desplazar en el tiempo los excesos eléctricos para suplir déficits de producción ocasionados por la variabilidad de las renovables. El mix eléctrico propuesto se compone de eólica y fotovoltaica, e implementa un sistema PtG que permite adaptar la generación eléctrica a la demanda (Fig. 2). Este sistema es el más idóneo dada la potencia instalada en Gran Canaria, se adapta a las fluctuaciones de potencia y el almacenamiento del metano puede ser prolongado.

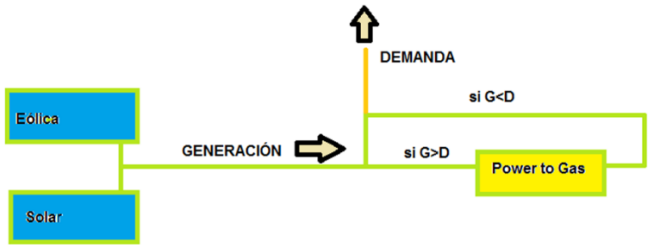


Fig. 2. Configuración del mix eléctrico planteado (G: generación eléctrica y D: demanda).

El sistema diseñado incluye electrolizadores que producen hidrógeno a partir de electricidad excedente; metanización, para generar metano a partir del hidrógeno y de captura de dióxido de carbono; y ciclo combinado que transforma la energía química del metano en energía eléctrica. A pesar de que el ciclo combinado no es una tecnología renovable, en este caso sus emisiones netas son nulas. El CO_2 empleado en la combustión del metano equivale al capturado para la producción del mismo en el proceso de metanización (Fig. 3). De forma global ocurre lo mismo con el agua y el oxígeno empleado en el sistema Power to Gas. El sistema idealmente no requiere aportes externos de agua ni de oxígeno, pues el oxígeno empleado en la combustión equivale al generado en los electrolizadores y el agua requerida por los electrolizadores proviene de la metanización, del vapor de agua de la combustión y de la parte no reaccionada en la reacción de electrólisis. Dada la escasez hídrica de la isla [9] supone una ventaja que el balance neto de agua en el sistema PtG sea nulo.

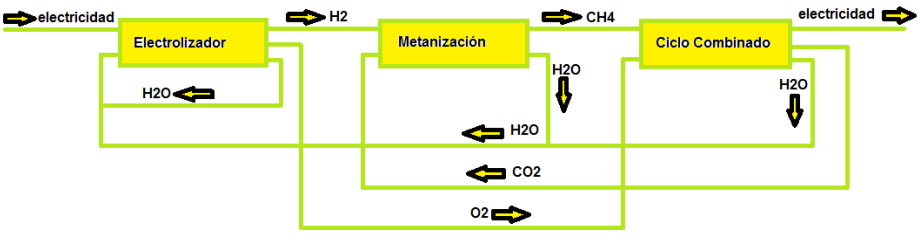


Fig. 3. Diagrama de bloques del sistema Power to Gas.

En el mix eléctrico propuesto se pueden dar tres situaciones. (i) La generación es igual a la demanda; el sistema Power to Gas no actúa y la generación proveniente de la potencia eólica y fotovoltaica es consumida directamente por el sistema. (ii) La generación es menor que la demanda; el sistema Power to Gas no actúa y la demanda es cubierta por la generación eólica-fotovoltaica y el aporte del ciclo combinado. (iii) La generación es mayor que la demanda; el sistema Power to Gas actúa transformando la diferencia entre generación y demanda en metano. La demanda es cubierta directamente por generación eólica-fotovoltaica.

2.1 Electrolizadores

La electrólisis del agua se produce mediante una reacción electroquímica en 2 pasos: en el cátodo con carga negativa tiene lugar la reacción de reducción, mientras que en el ánodo con carga positiva tiene lugar la reacción de oxidación. Existen tres tecnologías principales de electrolizadores. La electrólisis alcalina (AEL) se encuentra en fase comercial. Su electrolito es una solución alcalina y la temperatura de operación en las celdas oscila entre 40-90 °C [10]. La tecnología de Membranas de Electrolitos Poliméricos (PEM) también se encuentra en fase comercial. Como electrolito emplea membranas de polímero sólido y la temperatura de operación en las celdas oscila entre 20-100 °C [10]. La electrólisis de óxido sólido (SOEC) es una tecnología en desarrollo. Su electrolito es ZrO2 cerámica dopada con Y2O3. Esta tecnología presenta alta eficiencia eléctrica y permite la integración de calor residual, pues la temperatura de operación en las celdas oscila entre 800-1000 °C [10].

Para el diseño del sistema PtG se han elegido electrolizadores alcalinos por ser la tecnología más madura y la que implementa mayores potencias en sus equipos. Es una tecnología disponible comercialmente. Los electrolizadores de esta tipología permiten variaciones de carga y toleran hasta un 150% de su capacidad nominal en situaciones de sobrecarga [10]. Es más económica y existen módulos comerciales de 2 MW, por lo que para alcanzar la potencia total se dispondrán los electrolizadores necesarios en serie. En particular se han considerado electrolizadores con un consumo de 3.947 [11] kW/Nm3H2 , un rendimiento de 76% y un coste de 700.000 €/MW [9].

2.2 Metanización

Mediante metanización obtenemos metano a partir del hidrógeno obtenido en la electrólisis y del CO_2 proveniente de la combustión del ciclo combinado o de captura atmosférica. La metanización del CO_2 es un proceso exotérmico dado por la siguiente reacción global [12]:

$$4H_2 + CO_2 \leftrightarrow CH_4 + 2H_2 \qquad \Delta H298\ °K = -164,9\ kJ/mol \qquad (1)$$

Se pueden considerar dos tipos de metanización, la catalítica y la biológica. La metanización catalítica ha sido investigada desde hace décadas. Suelen operar a temperaturas comprendidas entre 200 °C y 550 °C y a presiones que van desde 1 a 100 bar. Como catalizador para la reacción de metanización se suelen emplear metales como

Ni, Ru, Rh y Co. En la mayoría de los casos se considera que el Ni es la elección óptima de catalizador debido a su actividad relativamente alta, buena selectividad de CH4 y a su bajo coste. Los reactores empleados pueden ser adiabáticos o isotermos. Los primeros son más complejos de operar dado que la reacción de metanización es exotérmica, pudiéndose alcanzar temperaturas elevadas que varíen la cinética de la reacción y dañen el catalizador. Los reactores isotermos necesitan refrigeración pero aportan mayor estabilidad al proceso ya que permiten fijar la temperatura de operación [10]. La metanización catalítica isotérmica parece ser la mejor alternativa para el sistema PtG planteado en Gran Canaria. Pues la configuración es relativamente simple y se adapta a grandes potencias, además el calor residual puede ser usado debido a la temperatura a la que se evacua de los reactores.

2.3 Simulación de un sistema de metanización catalítica isoterma

Para la simulación del sistema Power to Gas diseñado se ha empleado el programa EES (Engineering Equation Solver). Los parámetros más influyentes en la conversión del CO2 a CH4 son la presión y temperatura. Interesan temperaturas comprendidas entre 200-500 °C y presiones entre 1-100 bar. Dentro de estos rangos son preferibles temperaturas próximas a los 200 °C y presiones reducidas [12].

En el programa EES se ha calculado el equilibrio químico de la reacción que nos aportará la composición de los gases de salida. Para ello se han fijado los parámetros de presión y temperatura de forma aleatoria dentro de los valores propuestos anteriormente. De esta forma el programa resuelve las ecuaciones de equilibrio de las reacciones intermedias, y la total.

$$K_{p1}=(X_{CO}.X_{H2O})/(X_{CO2}.X_{H2}) \quad (2)$$

$$K_{p2}=(X_{CH4}\cdot X_{H2O})/(X^3_{H2}.X_{CO})(P_{reactor}/P_o)^2 \quad (3)$$

$$K_p= K_{p1}.K_{p2} \quad (4)$$

X_i es la concentración molar final del componente i, P_0 es la presión ambiente y Preactor es la presión del reactor.

$$X_j =i/(a+b+c+d+e) \quad (5)$$

donde (j, i) = (CO_2, a), (H_2, b), (CH_4, c), (H_2O, d), (CO, e)

$$K_{pi} = \exp((-G_{o,i})/(R.T_{reactor})) \qquad i=1,2 \quad (6)$$

donde R es la constante de los gases ideales, $T_{reactor}$ es la temperatura del reactor y $G_{0,i}$ es la energía libre de Gibbs de formación de la reacción i a presión ambiente.

Tras realizar los cálculos para distintas condiciones de presión y temperatura, con el objetivo de un contenido en metano superior al 95%db, se llega a la siguiente configuración: dos reactores isotermos a 10 bar y 350 °C. Para mejorar la conversión del CO2 a CH4 se elimina el 90% del agua contenido en los productos del primer reactor.

Configuración Sistema Power to Gas.
El metano producido en la metanización es almacenado y se transforma mediante ciclo combinado. Esta tecnología permite transformar la energía química del metano producido en energía eléctrica inyectada a la red en las situaciones en las que la demanda eléctrica es mayor que la generación renovable. Sus características principales son tiempo de arranque reducido y rendimientos elevados, además de conseguirse un balance neto de emisiones de CO_2 en la generación. Para la instalación de ciclo combinado se ha considerado un rendimiento del 56,43%. Tras analizar las distintas tecnologías que componen el Sistema Power to Gas obtenemos los siguientes parámetros de diseño y operación para el mismo (Tabla 2).

Table 2. Parámetros de diseño del sistema PtG.

Parámetros Power to Gas	
Tipo de metanización	Metanización catalítica
Nº reactores	2
Tipo de reactores	Isotermo
Presión	10 bar
Temperatura	350 ºC
Conversión	95.48% CH4
Rendimiento electrolizador	76
Rendicmiento metanización	81.81
Rendimiento ciclo combinado	56.43
Rendimiento Power to Gas	35.09

Se obtiene un rendimiento global para el sistema Power to Gas del 35,09%. Esto implica que de cada 100 MWh de energía producida en situaciones de excedente el sistema obtendrá 35,09MWh para su posterior consumo en situaciones deficitarias.

3 Dimensionamiento y análisis de un sistema eléctrico 100% renovable en Gran Canaria.

Para dimensionar el nuevo sistema eléctrico de la isla de Gran Canaria se han recopilado datos reales publicados por REE. Los datos recopilados corresponden al año 2.014 y 2.015. La demanda eléctrica anual, diaria y horaria se ha calculado como la media de los años 2014 y 2015. La potencia demandada diariamente es relativamente constante a lo largo del año, fluctúa entre los 280 y los 480 MW. Siendo la potencia instantánea máxima registrada de 558 MW en el periodo considerado (Fig. 1).

El parque de generación actual de Gran Canaria se caracteriza por un elevado porcentaje de potencia instalada cuyos combustibles son de origen fósil, en concreto un 89%, frente al 11% de potencia renovable. Ocurre lo mismo con la generación, un 91% es de origen no renovable frente a un 9% renovable (Tabla 1 y 3) [1].

Table 3. Estructura de generación para la isla de Gran Canaria en el año 2.015. Fuente: Anuario Energético de Canarias 2.015, Red Eléctrica de España

Mix eléctrico 2015	Potencia instalada [MW]	% Potencia instalada	Potencia máxima [%]	Horas equivalentes	% Generación aportado
Motores diesel	84,7	7,36	60	3124,4	7,72
Turbina de gas	173,5	15,08	66	329,9	1,67
Ciclo combinado	461,7	40,13	66	3479,2	46,87
Turbina de vapor	304,2	26,44	79	3902,0	34,63
Eólica	86,7	7,54	89	2993,7	7,57
Solar fotovoltaica	39,6	3,44	83	1326,4	1,53
Total	1.150,4				

El propósito es proyectar un mix eléctrico 100% renovable. Para ello se van a analizar las distintas alternativas renovables de posible implantación en la isla en base a criterios ambientales, geográficos y potencial energético del territorio.

La energía eólica es la que ofrece mayor recurso energético debido al potencial de viento en frecuencia y velocidad que ofrece la isla. Los parques eólicos instalados hasta la fecha registran valores próximos a las 3.000 horas equivalentes de generación al año (Tabla 3), valores superiores a la media de la Península. Además es una tecnología renovable que presenta bajos costes de inversión [13] y de generación.

La energía solar en Canarias dispone del mayor número de horas de sol de toda Europa con la intensidad apropiada para su utilización como fuente de energía [14]. La implantada mayormente hasta el momento es la fotovoltaica, pues no requiere espacios tan amplios como la solar térmica y es más fácil de operar.

Debido al clima de la isla caracterizado por escasas precipitaciones, 160 l/m² [9], no existen caudales regulares de agua por lo que históricamente no se han construido instalaciones hidráulicas.

Para instalar un porcentaje elevado de generación con biomasa habría que aprovisionarse de biomasa externa a la isla, dado el escaso recurso de biomasa en Gran Canaria. Esto crearía una dependencia del sistema eléctrico basada en la fluctuación de los precios de la biomasa, además de añadir un sobrecoste por transporte de la misma.

Actualmente se está realizando un estudio sobre el potencial geotérmico de la isla. Hasta la fecha no existen instalaciones geotérmicas, esta tecnología se encuentra en fase de estudio [7]. No obstante su aprovechamiento se plantea para instalaciones de climatización y de ACS.

Tenerife cuenta con 1,6 MW [1] instalados de biogás. En cualquier caso el porcentaje de energía que podría aportar esta tecnología sería reducido respecto del necesario para un mix 100% renovable.

Tras analizar cada alternativa se concluye que la energía eólica es la más idónea para su instalación de forma masiva, seguida por la energía solar fotovoltaica. Ambas son tecnologías consolidadas, con implantación en la isla y con costes de inversión y generación aceptables. No necesitan materias primas para la generación de electricidad y su impacto ambiental es únicamente paisajístico. El nuevo mix eléctrico se ha dimensionado bajo las siguientes premisas:

El parque de generación se compone de potencia eólica y fotovoltaica, que se complementa con un sistema de almacenamiento Power to Gas.

El sistema se ha dimensionado para abastecer la demanda correspondiente al periodo 2.014-2.015 en Gran Canaria, a partir de los datos de potencia requerida por el sistema en periodos diezminutales extraídos por REE. Para cada uno de los periodos considerados se ha realizado un balance de energía inicial y final. El balance de energía inicial es la resta entre el aporte total y la demanda. Donde el aporte total es la suma del aporte eólico y del aporte fotovoltaico. De esta forma, el balance de energía inicial es positivo si la generación es mayor que la demanda y negativo si la generación es menor que la demanda. Si el balance de energía inicial es positivo la diferencia entre generación y demanda redirecciona al sistema PtG. Si el balance de energía inicial es negativo el déficit entre generación y demanda se cubre con el almacenamiento del sistema PtG. El balance de energía final cuando es positivo equivale al balance de energía inicial tras aplicarle el rendimiento del PtG, 35,09%. El balance de energía final negativo equivale al balance de energía inicial en ese periodo.

Además de los balances inicial y final se han calculado otros valores de interés para aceptar o rechazar una solución. Uno de estos valores de interés calculados ha sido el porcentaje de variación de generación-demanda que permite conocer si el sistema es capaz de aportar la demanda necesaria en la totalidad del periodo considerado mediante la ecuación (12). Si es positivo el sistema será capaz de abastecer la demanda.

$$\%\ \text{Variación de generación} - \text{demanda} = \frac{\sum_{i=1}^{105120}(Generación\ directa + PtG)}{\sum_{i=1}^{105120} Demanda} - 1 \qquad (7)$$

La generación directa refiere a la parte del aporte total que no se destina a PtG y PtG es el balance de energía final positivo. Otro valor de interés es el porcentaje no transformado que se refiere al porcentaje del aporte total que se destina a la demanda del sistema sin pasar por el sistema PtG. Una tercera variable que se ha calculado es el pocentaje de demanda directa que es el porcentaje de la demanda que proviene del aporte total. Cuanto mayor sea menor será el coste de la demanda al operar menos horas el sistema PtG.

Una variable clave es la eficiencia del sistema que expresa la relación entre la demanda y la generación eléctrica necesaria para cubrir esta demanda. Una eficiencia mayor indica menor empleo del sistema PtG. Es decir, cuanto mayor sea la eficiencia más se parece el perfil de generación al de demanda.

La potencia del electrolizador es la asociada al balance de energía inicial positivo. La potencia nominal es el valor máximo de los periodos analizados. La potencia de metanización equivale a la potencia del electrolizador multiplicada por el rendimiento del electrolizador, 76% [11]. Y la potencia del ciclo combinado es la necesaria para cubrir el balance de energía final negativo máximo para los periodos analizados.

Para cada periodo se calcula el valor del almacenamiento anterior más la contribución del sistema Power to Gas en caso de que el balance de energía inicial sea positivo, menos el defecto en caso de que el balance de energía final sea negativo. El almacenamiento mínimo se ha fijado en 20 días [6]. Interesa conocer el valor del almacenamiento máximo por su relación directa con el coste como la diferencia entre el almacenamiento máximo y mínimo que indica la relación entre la demanda y el aporte total a lo largo del periodo considerado.

Para obtener las configuraciones que cumplen los requisitos planteados es necesario ejecutar los cálculos para distintos valores de potencia eólica y fotovoltaica. Por ello se definen el factor eólico, fe, y el factor fotovoltaico, ff. El objetivo es dimensionar un sistema alimentado con generación eólica y fotovoltaica. Para calcular las posibles soluciones se multiplica la generación eólica por el fe y la generación fotovoltaica por el ff. De esta forma se obtiene un sistema cuya potencia eólica y fotovoltaica es la instalada (Tabla 3) multiplicada por el fe y el ff respectivamente. Los valores de fe y ff considerados en el dimensionado del sistema han sido los comprendidos entre 0 y el valor mínimo que cubre la demanda instalando únicamente potencia eólica o fotovoltaica. Entre 0 y 23 en el caso de la eólica y entre 0 y 127 en el caso de la fotovoltáica. Obtenidos los posibles valores de fe y ff se ejecutan cálculos para las combinaciones de fe y ff. Una vez ejecutado el bucle para las posibles combinaciones se seleccionan como configuraciones técnicamente viables las configuraciones cuyo porcentaje de variación de generación-demanda este comprendido entre 0 y 1%. Debe ser mayor que 0% para que el sistema cubra la demanda e inferior a 1% para que no se genere más de lo demandado y el almacenamiento tienda a infinito.

Tras dimensionar el sistema anterior y obtener las configuraciones técnicamente viables se analizó el sistema con el objetivo de optimizar el modelo. Se comprobó que la potencia eólica aportaba por MW instalado más energía que la fotovoltaica, pues las horas equivalentes de funcionamiento de la primera son muy superiores a la segunda (Tabla 3). El almacenamiento de metano era mayor cuanto mayor era el porcentaje de potencia fotovoltaica, pues le generación eólica está más distribuida a lo largo de año y requiere menor almacenamiento. Además la potencia máxima alcanzada sobre la nominal por la tecnología eólica es inferior que en la fotovoltaica, por lo tanto la potencia necesaria del electrolizador para transformar los excedentes es inferior en el caso de la eólica. Se graficó la potencia del sistema Power to Gas en todo el periodo y se comprobó que la potencia instalada se alcanzaba en muy pocos periodos. Por ello se planteó limitar la potencia del Power to Gas, para reducir los MW instalados en detrimento de no transformar parte de la electricidad sobrante en periodos puntuales. Las potencia del sistema Power to Gas era de unos 1350 MW y se propuso limitarla a 950MW. La pérdida de energía no transformada asociada a esta limitación era de un 3%. Otra alternativa al modelo dimensionado fue introducir un almacenamiento intermedio de hidrógeno que permitiera reducir la potencia de metanización. De esta forma el hidrógeno producido según la distribución de los excedentes del sistema se puede almacenar y suministrar de forma continua a la metanización. Con esta variante se consigue reducir la potencia de metanización inicial, de 1350 MW a unos 230MW a cambio de instalar un almacenamiento intermedio de hidrógeno.

En base a los comportamientos de la tecnología eólica y fotovoltaica y considerando las modificaciones propuestas se plantean cuatro posibles modelos con la finalidad de comprobar cuál es el más idóneo. El **modelo 1** presentado en la Fig. 4a no considera limitar la potencia del electrolizador y no incluye un almacenamiento intermedio. El **modelo 2** presentado en la Fig. 4b no considera limitar la potencia del electrolizador y con almacenamiento intermedio. Mientras el **modelo 3** correspondería con la Fig. 4a pero considerando limitar la potencia del electrolizador y sin almacenamiento intermedio. El **modelo 4** considerar limitar la potencia del electrolizador y con almacenamiento intermedio, Fig. 4b.

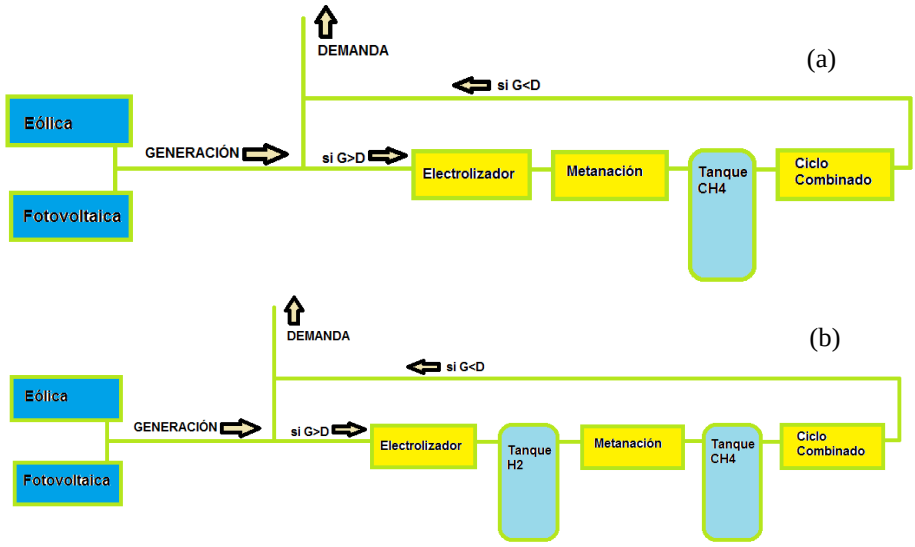


Fig. 4. Diagrama de bloques de los diferentes modelos analizados.

Tras realizar un primer análisis de todos los posibles modelos se obtienen configuraciones válidas para todos ellos en base a los criterios técnicos fijados anteriormente.

4 Evaluación económica y ambiental.

Tras analizar técnicamente los modelos expuestos en el apartado anterior se procede a realizar el análisis económico de los mismos. La finalidad es concluir cuál de los modelos propuestos que cumple las especificaciones técnicas conlleva un coste menor. En definitiva, que modelo es más eficiente y presenta un mayor grado de optimización.

Se van a analizar tanto los modelos propuestos como el correspondiente al mix eléctrico actual. Se pretende conocer si además de satisfacer la condición de ser un sistema renovable es más económico que el actual. Para ello se va a calcular en los modelos obtenidos el Valor Actual Neto (VAN) como cifra económica que permita valorar su rentabilidad económica y el coste de producción del MWh.

El análisis económico se realiza para un plazo de 25 años de vida útil de las tecnologías instaladas en los distintos modelos. A los costes de generación se les aplica un 1% de incremento anual, excepto al modelo actual para el que se considera un incremento anual del 2% dada la repercusión que tiene el coste del combustible en sus costes de generación. Para calcular el VAN y trasladar los costes de generación anuales al año 0 se ha aplicado una tasa de descuento del 2%, siendo este valor la estimación del IPC para los próximo años [15]. El VAN es el resultado de sumar los costes de generación para el periodo considerado, 25 años, y la inversión, ambos valores considerados a año 0. El coste de producción de un MWh para cada una de las configuraciones se obtiene como la relación entre el VAN y el total de energía vertida a la red durante los 25 años. La demanda eléctrica considerada en el análisis económico para cada uno de los 25 años se corresponde con la demanda media de Gran Canaria de los años 2.014-2.015.

Los costes considerados por MW instalado de las tecnologías proyectadas son referidos al año 2.020 (Tabla 4). Se ha supuesto que en caso de materializarse el proyecto este sería el año en el que se instalaría el nuevo parque de generación. Excepto el coste de generación para el ciclo combinado que es referido al año 2.015.

Table 4. Coste de las distintas tecnologías. Fuente: [13, 16, 17, 18, 19, 20, 21]

Tecnología	Coste generación [€/kWh]	Precio MWh instalado
Sistema actual	0,19	
Eólica	0,046	970.000 €/kW
Fotovoltaica	0,102	1.150.000 €/kW
Electrolizador	0,01725	700.000 €/kW
Metanación	0,041	500.000 €/kW
Ciclo combinado	0,02176	650.000 €/kW
Tanque H_2		4.495 M€/Mm^3
Tanque C H_4		866,666 M€/Mm^3

Tras analizar los costes de producción eléctrica y el VAN para las diferentes configuraciones se ha seleccionado la más económica de cada una de los modelos (Tabla 5). Los costes de producción se componen de los costes de generación y de los costes de inversión. A su vez los costes de generación incluyen los gastos de operación y mantenimiento.

En base a los costes de producción y al Valor Actual Neto (VAN) obtenidos para los modelos analizados se concluye que el modelo óptimo es el modelo 3 cuya configuración es la siguiente: se compone de 1.907,4 MW de potencia eólica y 118,8 MW de potencia fotovoltaica. El sistema PtG tiene una potencia limitada a 950 MW. La potencia de ciclo combinado es de 541 MW y el almacenamiento de metano una capacidad de 298.050 m3.

Table 5. Costes de producción eléctrica y VAN. Fuente: elaboración propia

Modelo	Coste producción	VAN [M€]

	[€/kWh]	
Modelo 0	191,93	16.336
Modelo 1	154,42	13.144
Modelo 2	230,60	
Modelo 3	150,96	12.849
Modelo 4	214,18	

El sistema eléctrico dimensionado presenta una eficiencia del 62,97%, un porcentaje de generación transformada del 54% y una demanda directa del 70,22%. El coste de producción obtenido para la presente configuración es de 150,96 € (Tabla 6).

Table 6. Características modelo elegido.

Modelo	3
Potencia eólica [MW]	1.907,4
Potencia fotovoltaica [MW]	118,8
Potencia electrolizador [MW]	950
Potencia metanización [MW]	722
Potencia ciclo combinado [MW]	541
Tanque de metano [m^3]	298.050
% variación generación-demanda	0.31
% transformado	54
% demanda directa	70,22
Eficiencia [%]	62,97
Rendimiento electrolizador [%]	76
Rendimiento metanización [%]	79,6
Rendimiento ciclo combinado [%]	58
Rendimiento Power to Gas [%]	35,09
Coste producción €/MWh	150,96

4.1 Análisis medioambiental

El sistema de generación eléctrica actual en la Isla de Gran Canaria está basado principalmente en fuentes de energía no renovables, en concreto tecnologías cuyos combustibles son fuel y gasoil. Este sistema de generación emite 1,68 kg de CO_2 -eq/kWh, en el año 2015 las emisiones totales fueron de 5.749,6 ktCO_2 –eq [1].

El sistema de generación que se plantea para la isla es un sistema 100% renovable que no necesita materias primas y cuyas emisiones durante su vida útil son nulas. Es cierto que las tecnologías renovables proyectadas llevan asociadas otros tipos de contaminación aunque de bajo impacto, paisajística y acústica. Aunque a primera vista

pueda parecer un impedimento sobre todo la tecnología eólica dado el impacto que tiene en el paisaje y debido al carácter turístico de la isla, en el futuro próximo puede considerarse como un referente en sostenibilidad cada vez más valorado por la sociedad y por los turistas. Por otra parte los sistemas de generación emisores de CO2 deben soportar el sobrecoste derivado de las emisiones realizadas que según fuentes de la Comisión Europea alcanzarán valores de 100 €/t CO2 en 2050 [4].

Destacar que el sistema PtG tampoco tiene emisiones en balance neto ya que la electricidad consumida en los electrolizadores proviene de fuentes de energía renovables y las emisiones generadas en la combustión del metano en el ciclo combinado son empleadas en la metanización. De modo análogo el agua requerida para el sistema PtG, pues el caudal de agua necesario por el electrolizador es el obtenido en la metanización y en la combustión del metano en forma de vapor.

5 Conclusiones

El sistema eléctrico de Gran Canaria se caracteriza por ser un sistema aislado, de tamaño reducido y estar basado mayoritariamente en fuentes de generación de origen térmico. Desde que se proyectó apenas ha evolucionado, en los últimos años ha comenzado a integrar energías renovables (eólica y fotovoltaica), aunque de manera testimonial. Por ello es necesario estudiar medidas que permitan reducir o eliminar la dependencia de los combustibles fósiles, mejorar la estabilidad del sistema y reducir el elevado coste de generación del actual sistema eléctrico.

La solución que se propone es un sistema eléctrico 100% renovable. Constituido por parques eólicos y fotovoltaicos. Para adaptar la generación a la demanda requerida por el sistema se implementa un sistema Power to Gas que permite trasladar los excesos de generación eléctrica a situaciones de déficit. El sistema Power to Gas se compone principalmente de electrolizadores y un proceso de metanización con el cual se transforman los excedentes de electricidad en metano. Este metano es almacenado y transformado mediante ciclo combinado para producir electricidad en las situaciones de déficit.

Por último, se ha constatado que el modelo propuesto basado en potencia eólica y fotovoltaica junto con un sistema Power to Gas es una alternativa viable técnica y económicamente. Presenta una eficiencia del 62,97% y es un 21,35 % más económico que el actual, además de ser renovable y e independiente de mercados exteriores.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Red Temática de la CYTED “CIUDADES INTELIGENTES TOTALMENTE INTEGRALES, EFICIENTES Y SOSTENIBLES (CITIES)” nº 518RT0558.

Bibliografía

[1] Gobierno de Canarias (2.016). "Anuario Energético de Canarias 2015". Gobierno de Canarias.
[2] Gobierno de Canarias (2.016). "Anuario Energético de Canarias 2014". Gobierno de Canarias.
[3] IPCC (2.014) "Climate Change 2014 Synthesis Report Summary for Policymakers". Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático
[4] Unión Europea (2.014). "Acción por el clima". Oficina de Publicaciones de la Unión Europea.
[5] Otto S. Bevacqua M. (2.015). "Revolución energética para las islas Canarias". Greenpeace.
[6]Centro Atlántico de Pensamiento Estratégico (2.013). "Política Energética en Canarias horizonte 2030". Centro Atlántico de Pensamiento Estratégico.
[7] Ingeniería, Investigación e Innovación para el Desarrollo Sostenible, S.L. (2.016)." Estudio del sistema de generación de energía eléctrica en la isla de Gran Canaria, con gestión eficiente de la producción y bombeo de agua y la movilidad con vehículos eléctricos". Cabildo de Gran Canaria.
[8] Gobierno de Canarias (2.012) "REVISIÓN PECAN 2006 - 2015" Gobierno de Canarias.
[9] "CLIMA: LAS PALMAS DE GRAN CANARIA" (2.017) (08/01/2.018). Disponible online https://es.climate-data.org/location/583/
[10] GÖTZ M (2.016) "Renewable Power-to-Gas: A technological and economic review" Renewable Energy
[11] Electrolizadores NEL (2.018) (08/01/2.018). Disponible online http://nelhydrogen.com/
[12] Bailera M. (2.014). "Almacenamiento híbrido de energía y CO2: Análisis económico y medioambiental de un sistema Power to Gas de metanización catalítica". TFM, Escuela de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de Zaragoza
[13] The Boston Consulting Group (BCG) (2.011) "Evolución tecnológica y prospectiva de costes de las energías renovables.Estudio Técnico PER 2011-2020". IDAE.
[14] Rodríguez J (2.014). "Las energías renovables en Canarias". FACULTAD DE ECONOMÍA, EMPRESA Y TURISMO, Universidad de la Laguna
[15] "Previsión IPC España" (05/01/2.018). Bankinter. Disponible online https://blog.bankinter.com/economia/-/noticia/2016/0/5/espana-2016-2017
[16] Llera E., Zabalza I.(2.011)." Hidrógeno: producción, almacenamiento y productos energéticos". Prensas Universitarias de Zaragoza, Universidad de Zaragoza.
[17] Causapé A. (2.006) "anales de mecánica y electricidad" ICAI
[18] EE Consultant, HESPUL, SOLAGRO (2.014). "Etude portant sur l´hydrogène et la méthanation comme procédé de valorisation de l´électricité excédentaire" ADEME
[19] "NER 300: PRODUCCIÓN CONVENCIONAL DE ENERGÍA" (2.010) (10/11/2.017). Disponible online http://www.mapama.gob.es/es/cambio climatico/temas/Planta_de_referencia_-_2%C2%AA_convocatoria_tcm7-272563.pdf
[20] "BBG- Bahía de Bizkaia" (03/01/2.018). Disponible online http://www.bbg.es/es/compartiendo-ideas/noticias/bahia-de-bizkaia-gas-inaugura-su-tercer-tanque-de-gnl-y-amplia-su-capacidad-de-almacenamiento-e-implementa-nuevos-servicios-de-carga-de-buques-metaneros/
[21] "Las tecnologías de almacenamiento de hidrógeno en vehículos y su proyección de futuro" (02/01/2.018). ICAI. Disponible online https://www.icai.es/contenidos/publicaciones/anales_get.php?id=1318

Comparación tecno-económica de sistemas híbridos FV-CSP en comunidades aisladas con climas cálido y templado

J. A. Aguilar-Jiménez[1][0000-0001-7094-9893], N. Velázquez[1], A. Acuña[2], R. Beltrán[3], R. López-Zavala[1], L. A. González-Uribe[1], S. Islas[1]

[1] Centro de Estudios de las Energías Renovables, Instituto de Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California, Mexicali, México.
[2] Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California, Mexicali, México.
[3] Centro de Investigación en Materiales Avanzados, Chihuahua, México.
a1116072@uabc.edu.mx

Resumen. En el presente trabajo se muestra la comparación tecno-económica de un sistema híbrido FV-CSP con almacenamiento térmico para la generación de energía eléctrica en comunidades aisladas bajo condiciones de clima cálido y templado. El sistema consta de un campo de módulos fotovoltaicos que satisface la demanda energética de la población en el día, periodo durante el cual un campo de concentradores solares calienta un fluido caloportador y lo almacena a alta temperatura, para posteriormente ser utilizado con un ciclo Rankine orgánico y producir energía eléctrica por las noches o lapsos con poca radiación solar. Se realizó la simulación de este sistema bajo condiciones ambientales de clima cálido y templado, donde el recurso solar y demanda energética impacta directamente en el dimensionamiento y producción de energía. Los resultados muestran que el sistema híbrido FV-CSP en comunidades con 60 viviendas es más atractivo económicamente en la región con clima templado, donde las variaciones en la demanda permiten un dimensionamiento de los equipos adecuado a las necesidades eléctricas de todo el año. Para la región con clima cálido el sobredimensionamiento del sistema en el periodo fuera de verano resulta en un incremento en la inversión inicial 2.5 veces mayor, además de desaprovechar la capacidad total del sistema durante la mayor parte del año.

Palabras clave: FV, CSP, Comunidad aislada.

1 Introducción

La energía eléctrica es una necesidad de primer nivel y en la actualidad resulta difícil concebir vivir sin este servicio. Sin embargo, en México existen un poco más de millón y medio de personas sin acceso a la electricidad [1] y más de mil millones en todo el mundo. Contar con ella es esencial para lograr una calidad de vida aceptable y un desarrollo sustentable que permita el crecimiento de la población en general. Actualmente el acceso a este servicio público sigue siendo inalcanzable para algunas poblaciones, principalmente dada su lejanía de los sistemas de transmisión eléctrica.

Dados los problemas que surgen al llevar energía eléctrica a todos los rincones del planeta donde se necesita (altos costos de inversión, pérdidas de transmisión), en la actualidad se proponen tecnologías capaces de producir este servicio en la misma región, es decir, instalar generadores de energía en el centro de consumo, sin la necesidad de una interconexión a la red de transmisión eléctrica. A esto se le llama electrificación descentralizada [2]. Las tecnologías renovables son una excelente opción para la electrificación rural ya que pueden instalarse en zonas remotas haciendo uso del potencial energético renovable existente en la localidad. Dentro de las energías renovables, la energía solar ha acaparado el mercado de la generación eléctrica descentralizada, dada su madurez tecnológica y disminución en costos, lo que le ha valido ser competitiva incluso con los combustibles fósiles. Sin embargo, un sistema eléctrico basado en energías renovables debe de ser bien diseñado y aplicado ya que una mala planeación puede perjudicar la factibilidad del proyecto. La región donde se implementarán estas tecnologías debe de ser estudiada en cuanto a la disponibilidad del recurso y necesidades energéticas, ya que las condiciones meteorológicas y sociales impactan directamente en el dimensionamiento del sistema.

En este trabajo se propone un sistema híbrido Fotovoltaico-Concentración Solar de Potencia (FV-CSP) con almacenamiento térmico para la generación de energía eléctrica en comunidades aisladas con clima cálido y templado. Las comunidades constan de 60 viviendas y su demanda eléctrica se basó en los requerimientos energéticos típicos de una casa habitación de cuatro integrantes. Se presenta la comparación tecno-económica de los sistemas operando con los distintos climas. La implementación de proyectos de energías renovables puede ser más o menos atractivos dependiendo de la región o aplicación, por lo que se analiza el impacto de las condiciones ambientales de la comunidad, así como sus necesidades energéticas en la factibilidad del sistema.

2 Descripción del Sistema

El sistema híbrido FV-CSP consta de un campo de módulos fotovoltaicos para la generación directa de energía eléctrica y otro campo de concentradores solares cilindros parabólicos (CCP) acoplados a un Ciclo Rankine Orgánico (ORC) para la conversión termoeléctrica. La energía térmica producida por los CCP es almacenada en un tanque durante el día, para ser empleada como fuente energética del ORC durante la ausencia de la radiación solar, en lugar de las baterías actuales. El sistema almacena calor sensible en el tanque, el fluido caloportador es llevado al evaporador del ciclo de potencia y regresado a otro tanque de baja temperatura, para que durante el día sea calentado en el campo solar y así repetir el ciclo. Las baterías son empleadas solamente para los periodos de intermitencia solar o picos bruscos de demanda eléctrica, almacenando los excedentes del campo fotovoltaico y del ORC. Un gestor de la energía se encarga de controlar los flujos eléctricos provenientes de los distintos generadores y cargas, además de administrar la correcta carga y descarga de las baterías. El diagrama esquemático del sistema FV-CSP se muestra en la Fig. 1, donde se aprecian sus componentes y las conexiones entre estos.

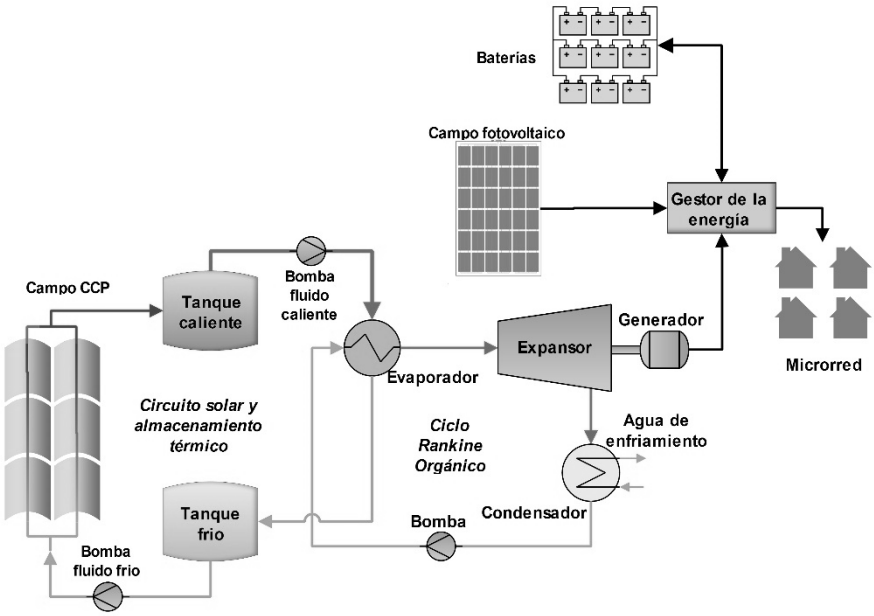


Fig. 1. Diagrama esquemático del sistema híbrido FV-CSP analizado.

2.1 Campo de concentración solar térmica

El campo de concentradores solares se encarga de proveer la energía térmica necesaria a nuestro ORC para su correcto funcionamiento durante las noches. El concentrador empleado es del tipo canal parabólico de la marca NEP Solar, modelo PolyTrough 1800 [3]. Los tanques de almacenamiento, encargados de acumular el calor generado por el campo solar durante el día y alimentar al ORC durante la noche o periodos de baja o nula radiación solar, utilizan una configuración de conexión directa (direct-feed storage tanks), de modo que el fluido de transferencia de calor es el mismo para ambos equipos. El tanque de almacenamiento frío se encarga de recibir al fluido proveniente del ORC y alimentar al campo de concentradores cuando la radiación solar disponible es suficiente. El tanque caliente almacena el fluido a alta temperatura para suministrar la energía térmica al ORC cuando este la necesita. La temperatura en este circuito está entre los 70-115°C, valor considerado para emplear agua como fluido caloportador, la cual es económica y de fácil adquisición.

2.2 Campo fotovoltaico

El campo de módulos fotovoltaicos opera híbridamente con el campo de concentradores solares, de modo que durante el día estos generan la energía eléctrica que necesita la comunidad mientras que los CCP calientan el fluido del tanque frio y se almacena energía en forma de calor sensible en el tanque caliente, para su uso durante las noches o

baja radiación solar. Como el almacenamiento es por medio de energía térmica, las baterías únicamente serán empleadas como auxiliar en dado caso de que se presenten picos de energía no soportables por la tecnología fotovoltaica y muy rápidos para que entre el ORC. Para dicho estudio no se consideró esta dinámica.

3 Metodología

Se desarrolló un simulador del FV-CSP empleando el software TRNSYS [4] y EES [5]. El sistema de concentradores solares, almacenamiento de energía, campo fotovoltaico, demanda de energía de la población, así como las condiciones de operación y control del sistema fueron simulados en TRNSYS, ya que este programa permite realizar simulaciones transitorias, teniendo la peculiaridad que puede trabajar con bases de datos climatológicos típicos (TMY por sus siglas en inglés), analizando el comportamiento del sistema bajo condiciones de operación más cercanas a la realidad. En la Fig. 2 se muestra el simulador desarrollado.

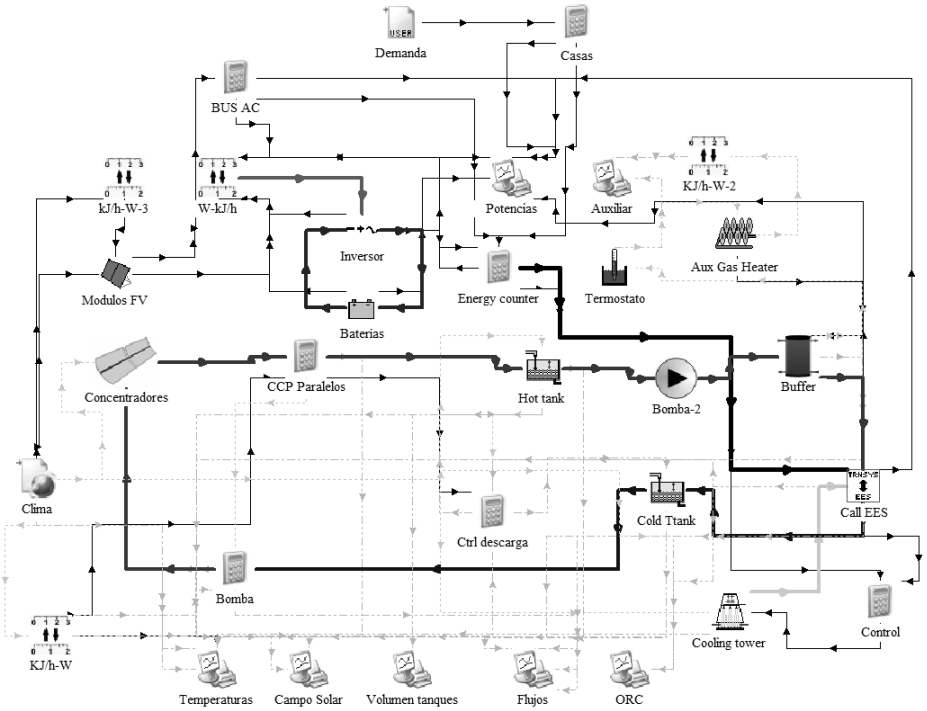


Fig. 2. Simulador desarrollado en el software TRNSYS.

El ORC, al ser una máquina térmica que trabaja con distintos tipos de fluidos orgánicos, se codificó en el programa EES dadas sus ventajas al simular sistemas termodinámicos y de transferencia de calor, ya que cuenta con una base de datos muy amplia de fluidos y sus propiedades térmicas. El modelo se basa en balances de energía en los componentes del ciclo. La bomba toma el fluido orgánico subenfriado y lo lleva a la

presión de operación, durante este proceso el fluido incrementa un poco su energía interna debido al trabajo mecánico que se le suministró, de modo que:

$$\dot{W}_{bom} = \dot{m}_{ORC} \cdot \left(h_{sal,bom} - h_{ent,bom}\right) \tag{1}$$

De igual forma el trabajo realizado por la bomba puede calcularse con el incremento de presión en el fluido, multiplicado por el volumen específico a la entrada de la bomba, todo esto dividido entre la eficiencia del motor de la bomba:

$$\dot{W}_{bom} = \frac{\dot{m}_{ORC} \cdot v_{ent,bom} \cdot (P_{sal,bom} - P_{ent,bom})}{\eta_{bom}} \tag{2}$$

El fluido, ya en presión alta de operación, es llevado al evaporador. En este equipo incrementará su temperatura hasta su saturación, siendo esta obtenida por el intercambio con el fluido de transferencia de calor del campo solar:

$$\dot{Q}_{eva} = \dot{m}_{ORC} \cdot \left(h_{sal,eva} - h_{ent,eva}\right) = \dot{m}_{sol} \cdot \left(h_{sal,sol} - h_{ent,sol}\right) \tag{3}$$

$$h_{ent,eva} = h_{sal,bom} \tag{4}$$

Esta corriente, a alta temperatura y presión, es llevada al equipo de expansión, el cual aprovechará la energía cinética generada por el cambio de presión, generando un trabajo mecánico que activará un generador eléctrico:

$$\dot{W}_{exp} = \dot{m}_{ORC} \cdot \left(h_{sal,exp} - h_{ent,exp}\right) \tag{5}$$

$$h_{ent,exp} = h_{sal,eva} \tag{6}$$

La entalpía de salida del expansor se calcula en base a la eficiencia de este equipo:

$$\eta_{exp} = \frac{h_{ent,exp} - h_{sal,exp}}{h_{ent,exp} - h_{sal,exp-ise}} \tag{7}$$

Donde $h_{sal,exp-ise}$ es la entalpía del fluido orgánico a la salida del expansor, considerando una expansión isentrópica. Esta corriente, ahora en estado sobrecalentado, es llevaba al condensador para convertirla en líquido subenfriado empleando agua de enfriamiento:

$$\dot{Q}_{con} = \dot{m}_{ORC} \cdot \left(h_{ent,con} - h_{sal,con}\right) = \dot{m}_{ae} \cdot \left(h_{sal,ae} - h_{ent,ae}\right) \tag{8}$$

$$h_{ent,con} = h_{sal,exp} \tag{9}$$

El trabajo mecánico neto generado por el ORC es el trabajo producido por el expansor menos el consumido por el motor de la bomba:

$$\dot{W}_{net} = \dot{W}_{exp} - \dot{W}_{bom} \tag{10}$$

La eficiencia termoeléctrica del ciclo es calculada con base al trabajo neto por la eficiencia del generador eléctrico, dividida sobre la energía suministrada para su operación:

$$\eta_{ORC} = \frac{\dot{W}_{net} \cdot \eta_{gen}}{\dot{Q}_{eva}} \quad (11)$$

El programa TRNSYS, basándose en las condiciones de operación (temperatura ambiente, recurso solar, estado de los equipos y demanda eléctrica de la población), entrega información a EES como variables de entrada para que calcule transferencias de calor, flujos másicos, necesidades energéticas, entre otros datos, volviéndose un proceso cíclico.

4 Resultados

Se llevaron a cabo simulaciones del sistema híbrido FV-CSP sometido al perfil de demanda máxima esperada para condiciones de clima cálido y templado. El tipo y cantidad de equipos máximo a conectar a la microrred por vivienda se basó en los requerimientos energéticos de una familia típica de cuatro integrantes viviendo en zonas con clima cálido, el cual contempla equipos para aire acondicionado (A/C), conservación de alimentos y entretenimiento, entre otros. La demanda eléctrica para la vivienda en condiciones climatológicas templadas es la misma que la esperada en regiones cálidas, pero sin contabilizar los sistemas de A/C. Para la región cálida se utilizó una base climatológica típica de la ciudad de Mexicali, Baja California, México, lugar donde se realizaron las mediciones de la demanda eléctrica durante todo un año, mientras que para la región con clima templado la de Coatzacoalcos, Veracruz, México. Estas demandas se pueden apreciar en la Fig. 3.

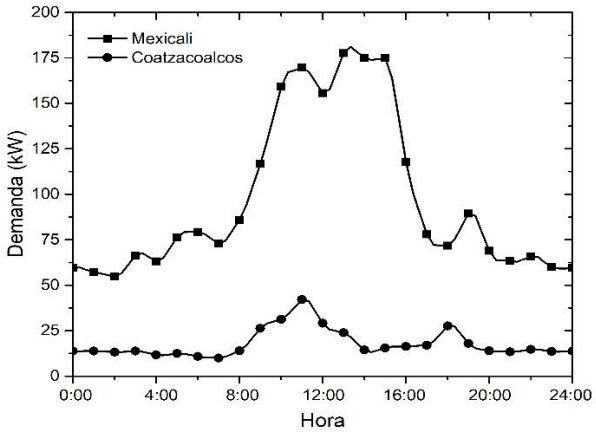


Fig. 3. Demandas eléctricas para clima cálido (Mexicali) y templado (Coatzacoalcos).

Para el clima templado la demanda corresponde al mes de agosto, cuando se espera que sea la máxima anual debido al uso de A/C principalmente; para el templado se presenta la del mes de julio. Estos requerimientos energéticos equivalen a 60 viviendas por comunidad. En la Fig. 4 se presentan las condiciones ambientales empleadas en la simulación del sistema FV-CSP.

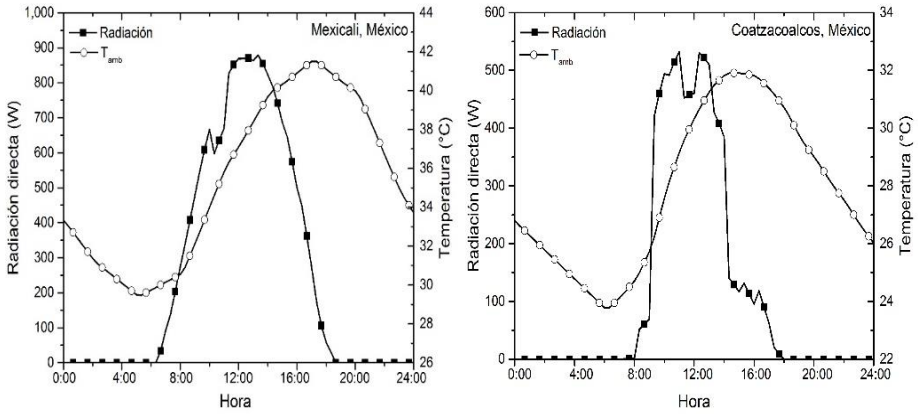


Fig. 4. Radiación y temperatura ambiente para clima cálido (Mexicali) y templado (Coatzacoalcos) empleadas en la simulación.

Basándose en lo anterior, se llevó a cabo el dimensionamiento de los sistemas híbridos. Se consideró cubrir al 100% la demanda máxima pronosticada para cada región, siendo esto crítico para las regiones con climas cálidos donde los requerimientos energéticos en temporadas con altas temperaturas pueden ser varias veces mayor que en temporadas frías. Si el dimensionamiento es para los periodos de verano, este sistema quedará sobredimensionado para el invierno y, si se toma la demanda de invierno, el sistema será muy pequeño. La idea es tener un equipo que cubra la máxima demanda esperada y aprovechar los excedentes energéticos en invierno para activar otros subprocesos, por lo que se seleccionó el verano. Los resultados del dimensionamiento se muestran en la Tabla 1, donde los coeficientes a_0, a_1 y a_2 corresponden a las pérdidas térmicas del concentrador solar.

Tabla 1. Características de los sistemas FV-CSP para 60 viviendas

	Clima cálido	**Clima templado**
Concentrador solar	PolyTrough 1800 [3]	
Área de apertura	4,500 m²	1,700 m²
a_0	0.689	
a_1	0.36 W/m² K	
a_2	0.0011 W/m² K²	
Temperatura de agua (ent/sal)	70/110 °C	
Tanques de almacenamiento	300 m³ c/u	25 m³ c/u
Máxima potencia del ORC	95 kW	30 kW
Fluido orgánico del ORC	R-245fa	
Relación de presión	6.5	
Potencia módulo fotovoltaico	310 W	
Potencia total fotovoltaica	234 kW	58 kW
Eficiencia del inversor	95%	

4.1 Operación del sistema en clima cálido

En la Fig. 5 se muestran las dinámicas de operación del sistema FV-CSP para la región con clima cálido. El ORC produce la energía necesaria durante los periodos nocturno, amanecer y atardecer de modo que, cuando la radiación solar permite la producción eléctrica directa con los módulos fotovoltaicos, la potencia del ORC disminuye en relación a la potencia fotovoltaica buscando satisfacer la demanda de la comunidad. Llega el momento en el que la energía eléctrica del ORC es del 50% de su capacidad total de producción, por lo que se mantiene operando a esta carga hasta que la parte fotovoltaica es capaz de satisfacer los requerimientos eléctricos de las viviendas, como se aprecia en el periodo de las 7:00-8:00. Esto es debido a que la eficiencia del ciclo termodinámico disminuye a carga parcial y en estos niveles de operación sería muy ineficiente.

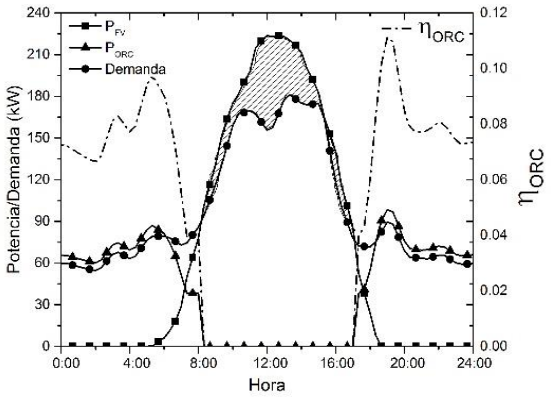


Fig. 5. Producción de energía eléctrica del sistema híbrido FV-CSP en clima cálido.

El área sombreada dentro de la figura anterior corresponde a un exceso de producción energética por parte del sistema fotovoltaico, la cual se almacena en el banco de baterías para cubrir los picos de demanda que no se tengan pronosticados, así como nublados o periodos de nula radiación solar y no se tenga listo el ORC. Cabe mencionar que el ORC produce un 10% más de energía eléctrica que la demandada por las viviendas, con fines de que no ocurra un colapso energético por sobredemanda.

En la Fig. 6 se aprecian las variaciones de volumen del fluido caloportador y los flujos en los tanques de almacenamiento de energía térmica. Durante las primeras horas del día el tanque caliente alimenta al ORC para la producción de energía eléctrica nocturna, por lo que su volumen disminuye, mientras que el del tanque frio incrementa recibiendo al fluido. En el momento en el cual el sistema fotovoltaico aporta a la generación, la alimentación al ORC baja para controlar la potencia del mismo. En este periodo el recurso solar es suficiente para calentar al fluido caloportador e ir almacenando energía térmica, por lo que el tanque frio inicia a bombear agua al campo solar y regresar el fluido al tanque caliente. La velocidad del flujo que se suministra al campo solar está en función de la radiación solar disponible, buscando tener a la salida de los

concentradores una temperatura de 115°C aproximadamente, como se aprecia en el periodo de 7:00-16:00. Si los tanques se encuentran a su nivel máximo y a la temperatura deseada, el bombeo a estos se detendrá y solamente se recirculará el fluido del campo solar.

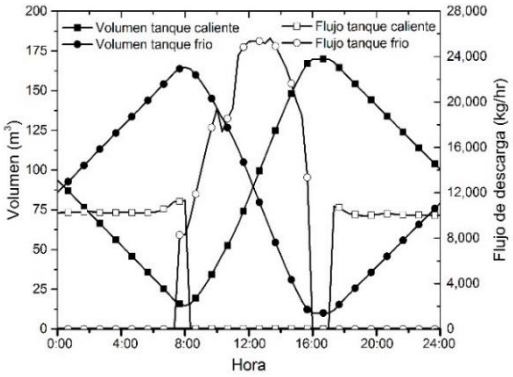


Fig. 6. Variaciones en el volumen y flujos de los tanques de almacenamiento del fluido del campo solar en la región con clima cálido.

4.2 Operación del sistema en clima templado

Las dinámicas de consumo y generación de energía del sistema híbrido para la región con clima templado se presentan en la Fig. 7. Se emplean las estrategias de operación del sistema anterior, sólo que las demandas y potencias en este escenario son menores debido a que no se contempla el uso de equipos de A/C por las temperaturas ambientales presentes. Ya que en este tipo de regiones el recurso solar es menor y los nublados son mayores, el ORC trabaja durante periodos de tiempo más prolongados y la producción eléctrica excedente del campo fotovoltaico debe de ser almacenada para satisfacer la demanda en dado caso de que estas intermitencias sean constantes.

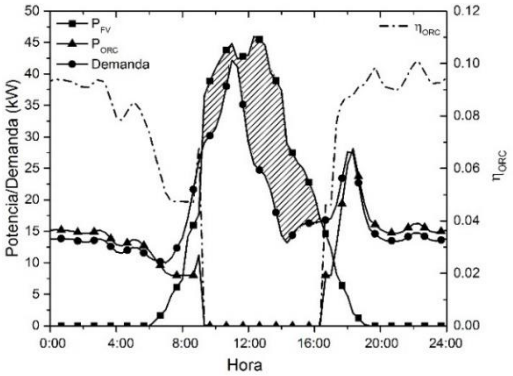


Fig. 7. Producción de energía eléctrica del sistema híbrido FV-CSP en clima templado.

Los cambios en el volumen y flujo de los tanques de almacenamiento para esta región con clima templado se presentan en la Fig. 8. En esta comunidad el recurso solar es menor, por lo que el bombeo del fluido caloportador al tanque frio y, por ende, la operación del ORC son más prolongadas. Se aprecia que, debido a la intermitencia solar en el periodo de las 12:00 y los bajos niveles de radiación en el periodo de 14:00-16:00 (Fig. 4), el volumen del tanque caliente no alcanza su punto máximo de diseño, por lo que la energía térmica almacenada para el periodo nocturno no será suficiente y se hará uso de la energía química que se almacenó con los excedentes fotovoltaicos.

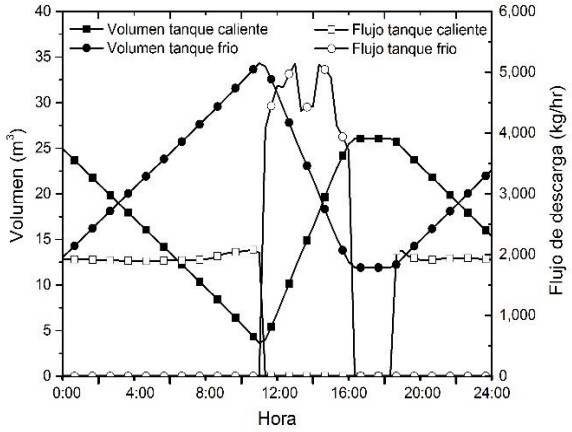


Fig. 8. Variaciones en el volumen y flujos de los tanques de almacenamiento del fluido del campo solar en la región con clima templado.

4.3 Comparación económica

Para analizar económicamente los sistemas y compararlos durante su vida útil, se calcularon indicadores económicos basados en plantas de generación de energía eléctrica. Para la comparación se empleó el costo nivelado de la energía (LCOE, por sus siglas en inglés), el cual es la valoración económica del costo del sistema de generación de electricidad que incluye todos los costos a lo largo de la vida útil del proyecto, el cual se consideró 25 años para ambos, y se calculó de la siguiente manera [6]:

$$LCOE = \frac{NPV\ (USD)}{E_{gen}\ (kWh)} \tag{12}$$

Donde NPV es el valor presente de la inversión total sobre la vida de la planta y E_{gen} la energía que la misma producirá durante todo ese tiempo. El NPV es:

$$NPV = CAPEX + O\&M \tag{13}$$

$CAPEX$ equivale al costo de capital del sistema y $O\&M$ los gastos de operación y mantenimiento durante la vida útil del proyecto y se calcula según:

$$O\&M = \sum_{i=1}^{plant\ life} O\&M(i) \quad (14)$$

Donde $O\&M(i)$ son los gastos de operación y mantenimiento durante el i año de operación. Se asumió un gasto de $O\&M(i)$ del 2% del CAPEX para los dos sistemas y una tasa de inflación anual (ir) del 5%. Entonces, el $O\&M(i)$ se calcula:

$$O\&M(i) = 0.02 \times CAPEX \times (1 + ir)^{i-1} + R(i) \quad (15)$$

$R(i)$ corresponde a las eventualidades que puedan surgir durante la operación del sistema en cuanto a repuestos o cambios de equipos individuales por su vida útil. Para ambos sistemas se consideró un gasto del 30% del costo del inversor cada 10 años, basándose en las garantías típicas de estos equipos. Las estimaciones de los costos de los equipos para ambos sistemas se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Costos de los equipos e instalación de los sistemas FV-CSP [6–9]

Inversión inicial	
Campo CSP (cálido-templado)	210-250 USD/m²
Tanque de almacenamiento	775 USD/m³
ORC (cálido-templado)	4,000-7,200 USD/kWe
Módulos fotovoltaicos	600 USD/kW
Inversor	248 USD/kW
Balance de la planta	248 USD/kW
Costos anuales del sistema	
OPEX	2%
Tasa de inflación	5%
Costo de repuesto	
Inversor	30% de la inversión c/10 años

La energía total que los sistemas producirán durante su vida útil se calculó basándose en el perfil de demanda esperado de la comunidad durante todo el año, suponiendo que ambos generarán esa energía. En la Fig. 9 se aprecia la acumulación anual de consumo energético de las comunidades con 60 viviendas, las cuales son de 275.4 y 126.5 MWh para el clima cálido y templado, respectivamente. Cabe mencionar que durante los primeros meses del año las demandas eléctricas se esperan sean idénticas para los dos climas, sin embargo, con la llegada de temperaturas ambientales elevadas en la región cálida se incrementa la demanda debido al uso de equipos de A/C, siendo muy relevante en el periodo de junio a septiembre.

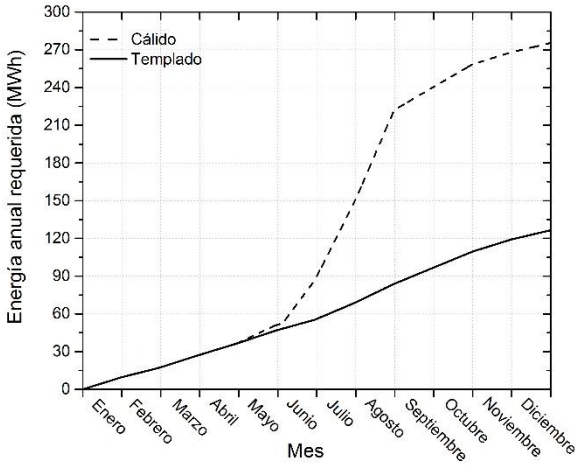


Fig. 9. Energía anual requerida para los sistemas FV-CSP

Los resultados del estudio económico durante los 25 años de vida útil considerados se presentan en la Tabla 3. Se puede apreciar la gran diferencia en el CAPEX, donde el sistema FV-CSP para la región con clima cálido es 2.5 veces mayor que para el sistema en la región templada, debido a la gran cantidad de equipos que se deben de adquirir para satisfacer la demanda en el verano. Los costos de operación y mantenimiento también son 2.5 veces mayor para el sistema en clima cálido. Cabe señalar que la capacidad eléctrica total instalada es de 329 y 88 kW para las regiones cálidas y templadas, respectivamente. Esto significa que el primer sistema es 3.7 veces más grande. Sin embargo, la producción de energía del FV-CSP en clima templado es solamente 2.1 veces menor. Es importante mencionar que el sobredimensionamiento del sistema en la región con clima cálido es muy notorio en el periodo de septiembre-mayo, cuando su potencia total de producción energética es desaprovechada. Esto trae como resultado un LCOE de 0.53 USD/kWh para el sistema en clima cálido, 16% mayor que el 0.45 USD/kWh del clima templado.

Tabla 3. Resultados del análisis económico durante la vida útil del proyecto

	Clima cálido	***Clima templado***
Producción de energía	6,885 MWh	3,163 MWh
CAPEX	1,857,922 USD	736,955 USD
O&M	1,808,283 USD	712,154 USD
NPV	3,666,205 USD	1,449,109 USD
LCOE	0.532 USD/kWh	0.458 USD/kWh

Estos LCOE pueden ser disminuidos en grandes proporciones, especialmente para el sistema FV-CSP en la región cálida. Este sistema está sobredimensionado para gran parte del año, donde la capacidad de producción eléctrica es desaprovechada por la baja

demanda de la comunidad cuando no necesitan los A/C, por lo que, si se le da un uso a su capacidad total comercializando la energía, activando subprocesos como desalación, calefacción, deshidratación, entre otros, la disminución del costo por la energía puede ser de hasta un 50%, siendo mucho más atractivo económicamente. Para el sistema en la región con clima templado también puede disminuir el LCOE, pero no en las mismas cantidades. Para ambos sistemas el factor escalamiento puede mejorar el precio de la energía, es decir, si estos equipos son instalados en comunidades más grandes o con demandas eléctrica mayores, el costo inicial de las tecnologías eléctricas y térmicas, especialmente el ORC y concentrador solar, disminuye por adquirir equipos de mayor capacidad, impactando directamente en el precio final de la energía. Estos dos factores (aprovechamiento máximo de la energía y escalamiento) serán tratados a detalle en futuros trabajos.

Hay que tener en cuenta que estos LCOE no son nada competitivos con los encontrados actualmente en las grandes plantas solares comerciales, que rondan los 0.15 USD/kWh. Sin embargo, es importante mencionar que la generación eléctrica de los sistemas híbridos en comunidades aisladas está limitada a los consumos energéticos de sus habitantes que, en muchos casos, se trabajará en condiciones de carga parcial. Esto no ocurre en las plantas comerciales, donde lo que se busca es maximizar la generación e incrementar la cantidad de energía suministrada a la red, logrando LCOE mucho más bajos. No obstante, es necesario llevar electricidad a las regiones donde la necesiten y el costo de la misma en ocasiones no debe de ser un impedimento.

5 Conclusiones

Se comparó técnica y económicamente un sistema híbrido FV-CSP con almacenamiento térmico instalado en dos regiones aisladas de la red eléctrica con climas distintos: cálido y templado. Se llevó a cabo el dimensionamiento de los equipos para ambas condiciones, considerando comunidades de 60 viviendas con demandas eléctricas pronosticadas, donde solamente se difieren en la temporada de verano, donde la comunidad con clima cálido necesita de equipos de A/C para soportar las altas temperaturas ambientales.

Los resultados muestran que, para el mismo número de viviendas, el sistema FV-CSP en el clima cálido es 3.7 veces mayor en potencia instalada que el del clima templado, pero la producción de energía es solamente 2.1 veces mayor, esto debido al sobredimensionamiento de los equipos en la mayor parte del año. El costo de inversión inicial es un factor crítico para las comunidades con temperaturas ambientales altas durante pocos meses, ya que obliga a instalar un sistema de gran capacidad, el cual será desaprovechado durante el resto de los meses con temperaturas menores. Para las comunidades con clima templado esto no ocurre, ya que las demandas eléctricas son más estables durante todo el año, permitiendo lograr un alto factor de planta. Sin embargo, el LCOE de ambos puede ser mejorado al ser aplicado a comunidades con mayores demandas eléctricas o al aprovechar toda su capacidad de generación, especialmente en el sistema híbrido de la región cálida.

Agradecimientos

"Los autores dan las gracias a la Red Temática de la CYTED "CIUDADES INTELIGENTES TOTALMENTE INTEGRALES, EFICIENTES Y SOSTENIBLES (CITIES)" nº 518RT0558 y a CONACYT - SENER - SUSTENTABILIDAD ENERGÉTICA por el apoyo recibido a través del proyecto P09 del CEMIE-Solar."

Referencias

1. CFE: Comisión Federal de Electricidad, http://saladeprensa.cfe.gob.mx/boletines/show/8328/.
2. Fusheng, L., Ruisheng, L., Fengquan, Z.: Microgrid Technology and Engineering Application. (2014).
3. NEP Solar: PolyTrough 1200, http://www.nep-solar.com/products/polytrough-1200/.
4. Klein, S.A., Beckman, W.A., Mitchell, J.W., Duffie, J.A., Duffie, N.A., Freeman, T.L., Mitchell, J.C., Braun, J.E., Evans, B.L., Kummer, J.P.: TRNSYS 17, (2009).
5. Klein, S.A., Alvarado, F.L.: EES: Engineering equation solver for the Microsoft Windows operating system, (1992).
6. Patil, V.R., Biradar, V.I., Shreyas, R., Garg, P., Orosz, M.S., Thirumalai, N.C.: Techno-economic comparison of solar organic Rankine cycle (ORC) and photovoltaic (PV) systems with energy storage. Renew. Energy. 113, 1250–1260 (2017).
7. ElectraTherm: Power+ Generator 6500 – up to 110kWe, https://electratherm.com/products/power-plus-generator-6500-up-to-110kwe/.
8. Kurup, P., Turchi, C.S.: Parabolic Trough Collector Cost Update for the System Advisor Model (SAM). (2015).
9. Petrollese, M., Cocco, D.: Optimal design of a hybrid CSP-PV plant for achieving the full dispatchability of solar energy power plants. Sol. Energy. 137, 477–489 (2016).

Digitalización de medidores de agua analógicos para la modernización a bajo costo del sistema de suministro de agua potable en ciudades

Anthony Vega and Carlos Meza

Instituto Tecnológico de Costa Rica
Electronic Engineering School,
Cartago, Costa Rica
cmeza@tec.ac.cr

Abstract. Uno de los sistemas esenciales en una ciudad es la red de suministro de agua potable. Integrar sensores, medidores inteligentes y remotos en esta red puede simplificar y mejorar su operación y supervisión. Medidores inteligentes, digitales y remotos están fuera del alcance de muchas ciudades dado su costo elevado y a que utilizan protocolos y servicios propietarios que en algunos casos también son de pago. En este artículo se presenta una solución para la digitalización y medición remota de medidores de agua sin necesidad de modificar los medidores existentes y con un costo bajo. La solución propuesta implica la incorporación de un subsistema que captura la imagen de la carátula del medidor de agua analógico y la transmite a otro subsistema que se encarga de identificar el valor medido. Este artículo se concentra en el proceso de identificación de la medición.

Keywords: medidor de agua, reconocimiento de texto, procesamiento de imágenes

1 Introducción

El sistema de suministro de agua potable municipal es una red compleja que es vulnerable a desastres naturales y otras amenazas causadas por el hombre. El desarrollo de tecnologías de la información y comunicación y otras tecnologías para hacer ciudades más inteligentes y sostenibles están permitiendo la generación de herramientas que permitan gestionar y supervisar de forma más precisa y oportuna el suministro de agua potable (e.g., [3], [4], [6]). Ésta gestión es también compleja debido a que los escenarios de distribución de agua son impredecibles dado que los patrones de consumo y suministro de agua normalmente no son conocidos.

Para poder generar modelos de predicción de consumo y suministro, además de sistemas de diagnóstico y detección temprana de fallas es necesario instrumentalizar el sistema de suministro de agua potable. Idealmente esta monitorización se debería realizar en con puntos de monitorización automático ubicado

en distintos ramales del sistema de suministro ([9]) y en los puntos de consumo final ([8], [1]. No obstante, los sistemas de monitorización automática con medición remota son normalmente costosos y su estructura de datos y protocolo de comunicación son propietarios. Es importante destacar que el costo de estos equipos de medición está asociado no sólo al costos de sus componentes y su desarrollo sino también a los procesos de certificación a los que deben ser sometidos. Estos procesos de certificación son especialmente necesarios para los medidores de consumo final, los cuales son utilizados para el cobro por el servicio de suministro. La situación anteriormente descrita puede atrasar y complicar el proceso de modernización del sistema de suministro de agua potable en ciudades de países de bajo y medio ingreso.

Este es justamente el caso que experimenta la ciudad de Cartago, Costa Rica. El gobierno de esta ciudad de 220 000 habitantes tiene a su cargo un sistema de suministro de agua potable alimentado por cinco pozos con alrededor de 35 000 medidores de agua. Los medidores del agua son analógicos iguales a los mostrados en la Fig. 1. Éstos medidores son muy robustos y de bajo costo (aprox 20 euros cada uno) pero tienen el inconveniente de que requieren tener personal que realice el registro de las mediciones. El proceso de medición es llevado a cabo por 11 personas y tarda aproximadamente un mes. No existe una validación de los datos y existen sospechas que algunos abonados realizan alteración de los medidores. El gobierno de la ciudad se encuentra analizando opciones para digitalizar los medidores, no obstante el costo de dichos medidores supera el presupuesto disponible además de que ofrecen soluciones propietarias con un esquema de servicios en la red. Esto es, los datos de los medidores de agua son subidos a un servidor de la empresa propietaria los cuales luego cobran al gobierno por el acceso mensual a los datos.

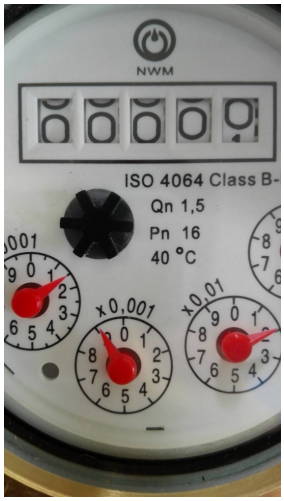


Fig. 1. Carátula de los medidores de agua que se desean digitalizar

El presente trabajo pretende brindar una alternativa para la modernización de los sistemas de suministros de agua potable sobretodo de ciudades de bajo y medio ingreso. La solución consiste en el desarrollo de un subsistema electrónico que permita capturar una imagen de carátula de los medidores, digitalizarla y reconocer el dato que registra. Este subsistema es fácilmente integrable a los medidores actuales y permite una graduable digitalización de la red.

El desarrollo de medidores de agua digitales que integran internet de las cosas ha sido tratado en varios trabajos como en [1], [8], [3] y [5], no obstante todos estos medidores representan nuevos dispositivos que, para su instalación inmediata, requieren de un proceso de certificación y validación con organismos internacionales. Por otro lado, en [7] se implementó un digitalizador de medidores analógicos como el propuesto en este artículo, con la diferencia de que es únicamente aplicable a medidores con aguja.

Este artículo describe y se enfoca en el proceso de digitalización e identificación numérica de medidores analógicos de agua. La sección 2 se describe la composición completa del sistema de medición a nivel de diagrama de bloques no se detallan todos ellos. La sección 3 detalla el proceso de selección y recorte de la sección de interés de los medidores además del procedimiento seguido para identificar los dígitos. Algunos casos reales que presentan desafíos para la identificación numérica se presentan en la sección siguiente. El artículo termina con las principales conclusiones del trabajo y el trabajo futuro que se piensa desarrollar.

2 Sistema de monitorización propuesto

En el diagrama de la figura 2 se muestra el sistema de medición propuesto. Éste consiste de un subsistema electrónico, etiquetado en la figura como **S1**, que captura la imagen la transmite por radiofrecuencia otro subsistema, **S2**. El subsistema **S2** debe ser un dispositivo con la capacidad de correr algoritmos de identificación de imágenes. También el subsistema **S2** puede representar una aplicación en un servidor.

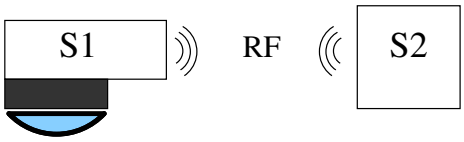


Fig. 2. Diagrama de bloques del sistema propuesto de medición de agua

Como se mencionó en la introducción, por motivos de espacio, en este artículo se detallará el procedimiento que ocurre en el subsistema **S2** que es el encargado de la interpretación de las imágenes. No obstante, el dispositivo **S1** se implementó utilizando una cámara de bajo costo (menor a 20 EUR) de una resolución de 640x480 píxeles. Todad las imágenes de la carátula de los medidores que se analizarán en este documento fueron tomadas con dicha cámara.

De esta forma, el concepto del sistema de medición que se propone es un subsistema electrónico (S1) de muy bajo costo que se integre a cada medidor analógico y se encargue únicamente de transmitir imágenes a un servidor u otro dispositivo (S2). Los autores consideran que, en fabricación en masa, el costo de los componentes que conforman subsistema S1 puede rondar los 20 EUR. Asi mismo, este sistema propone uno o un conjunto pequeño de dispositivos de mayor capacidad de procesamiento (subsistema S2) que sea capaz de procesar las imágenes. Los resultados de procesamiento presentados en este trabajo fueron realizados con el procesador de un Raspberry Pi 2 que tiene un costo de alrededor 40 EUR.

El resto del artículo describe el procedimiento que ocurre cuando el dispositivo S1 transmite la imagen de la carátula al subsistema S2 y éste inicia el procesamiento necesario para identificar la medición.

3 Digitalización e identificación de la medición de agua

3.1 Recorte de la sección de interés

En la carátula de los medidores de agua hay gran cantidad información, pero la sección de interés corresponde únicamente al dato de consumo que está formado por 5 dígitos que en los medidores de interés se encuentra delimitado por un rectángulo. En la figura 1 se observa una fotografía de la carátula de los medidores de agua que se desean digitalizar. Se puede apreciar que la información de interés se encuentra ubicada dentro del rectángulo. De esta forma, el primer proceso que se realiza para digitalizar la medición de agua consiste en la identificación de este rectángulo.

Para identificar el rectángulo de la carátula del medidor se sigue el procedimiento descrito en el diagrama de flujo de la Fig. 3. La primera acción del proceso de reconocimiento del rectángulo consiste en obtener la información básica de la imagen (e.g., ancho y alto), luego, se aplican las siguientes operaciones y filtros para resaltar las propiedades que facilitan la identificación del rectángulo:

1. Conversión entre espacios de color para obtener la imagen en escala de grises.
2. Aplicación de un filtro bilineal: produce un suavizado de la imagen y reduce el ruido. Este filtro funciona de forma muy similar a la operación de un filtro gaussiano adaptativo, siendo la principal diferencia que para el filtro bilineal se utiliza la intensidad ponderada y no la desviación estándar. Este método permite conservar los bordes y aumentar el contraste de la imagen tal y como se muestra en la figura 4.

Una vez aplicados los anteriores filtros se procede a identificar los bordes de la imagen. Para ello se utiliza un detector de Canny el cual consiste de los siguientes pasos: primero se reduce el ruido de alta frecuencia utilizando un filtro Gauss, este se refleja en la imagen como “suavizado” en los cambios de color entre píxeles adyacentes. Luego, se aplican dos máscaras de convolución en las direcciones de x y y, de esta forma, se analiza la imagen de forma independiente para cada

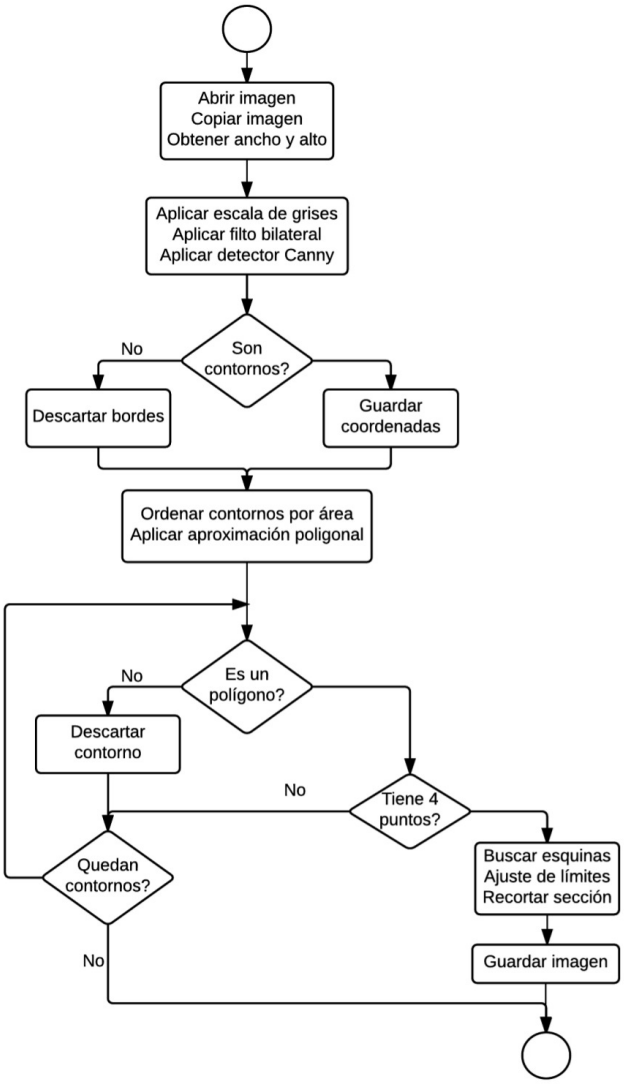


Fig. 3. Diagrama de flujo del proceso que identifica el rectángulo en la carátula del medidor de agua

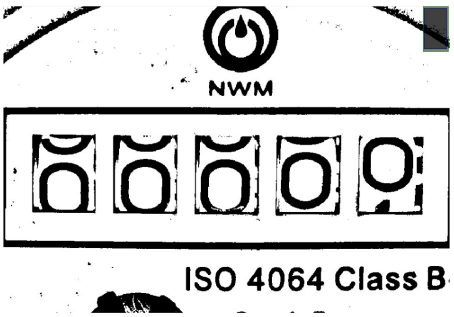


Fig. 4. Resultado al aplicar un filtro bilineal

dirección permitiendo encontrar la intensidad y dirección del gradiente de la imagen que, luego del suavizado, tendrá una distribución más uniforme a lo largo de la imagen. Posteriormente se aplica un proceso de supresión no máxima que se encarga de borrar los píxeles que no se consideran parte del borde, esto deja únicamente línea delgadas que son potenciales bordes de la imagen. Finalmente, por medio de histéresis basada en dos umbrales (superior e inferior) se filtran los píxeles de la siguiente forma:

- Si el gradiente del píxel es mayor al umbral superior, el píxel se considera parte del borde.
- Si el gradiente del píxel es menor al umbral inferior, entonces el píxel se descarta.
- Si el gradiente del píxel se encuentra dentro del rango de umbrales, se considera parte del borde solamente si alguno de sus píxeles adyacentes es parte del borde.

. La nueva imagen con los bordes detectados se muestra en la figura 5



Fig. 5. Identificación de contornos

En este punto del procesamiento se cuenta con un vector con una gran cantidad de bordes, incluso algunos que no son apreciables en la imagen resultante

porque están formados por muy pocos píxeles. Para eliminar estos bordes que no son de interés se procede a identificar únicamente los bordes cerrados, es decir, aquellos que delimitan una región con área finita. El resultado se puede apreciar en al Fig. 6.

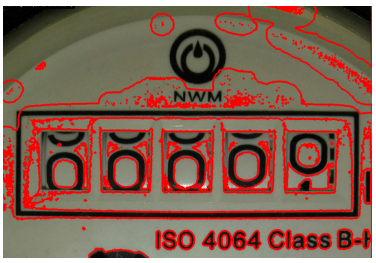


Fig. 6. Figura con contronos cerrados destacados

Del conjunto de los bordes cerrados son útiles únicamente aquellos que tienen forma poligonal. Es por lo tanto necesario realizar otra discriminación que elimine aquellos bordes que no pueden ser aproximados por un polígono. El resultado se puede observar en la Fig. 7, en donde además se observa que los contornos resultantes luego de la discriminación poligonal son más distinguibles.

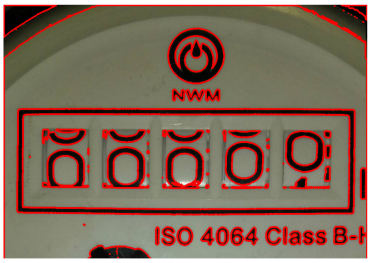


Fig. 7. Contornos que pueden ser aproximados con una expersión poligonal

Finalmente, se identifica el borde que tiene forma de rectángulo. Para ello se hace un ordenamiento descendente respecto al área delimitada por cada contorno. Dado que se tiene un conocimiento previo de cómo son las carátulas de los medidores de agua, se sabe que el contorno rectangular de interés es aquel que tiene el área mayor. De esta forma, se toma el primer borde de la lista como aquel que representa el rectángulo de la medición y se verifica contando el número de vértices del cada contorno. El contorno seleccionado es aquel que tiene mayor área y cuatro vértices tal y como se aprecia en la figura 8.

Una vez identificado el rectángulo se procede a recortar al área para que incluya únicamente la medición. El procedimiento de recorte debe asegurar que



Fig. 8. Sección detectada después del filtrado por área

no se alteraran las proporciones originales de la imagen, por ello, utilizando las dimensiones del rectángulo encontrado y mediciones experimentales, se determina la relación de longitud desde las esquinas externas hasta el borde interno. Con este factor de corrección se ajustan las coordenadas para extraer el recorte sin modificar la relación de aspecto original. La figura 9 muestra la imagen final resultante que será utilizada en la etapa de reconocimiento.



Fig. 9. Recorte final extraído

3.2 Digitalización del dato de consumo

Para digitalizar y reconocer los caracteres es necesario aplicarle varios filtros para aumentar las probabilidades de una reconocimiento exitoso. Dee sta foma se aplica un filtro para la reducción de ruido y la segmentación de los dígitos en el recorte, es decir, se genera una imagen por separado para cada dígito. Posteriormente, se construye una nueva imagen que ordena los dígitos como un solo número. Este proceso se ilustra en la figura 10.

La primera parte del proceso corresponde al preprocesamiento del recorte, es decir, la preparación de la imagen para poder identificar y separar cada dígito, por lo tanto se repite una parte del procedimiento ejecutado para buscar el rectángulo con la lectura, pues igual que en ese caso se buscan contornos, con la diferencia de que ahora no están parametrizados geométricamente.

El proceso de identificación de dígitos utilizado se ilustrará utilizando la fotografía mostrada en figura 11 a la cual se le aplica un filtro gaussiano con $\sigma = 5$ para conseguir un suavizado ligero y luego un filtro bilateral para eliminar

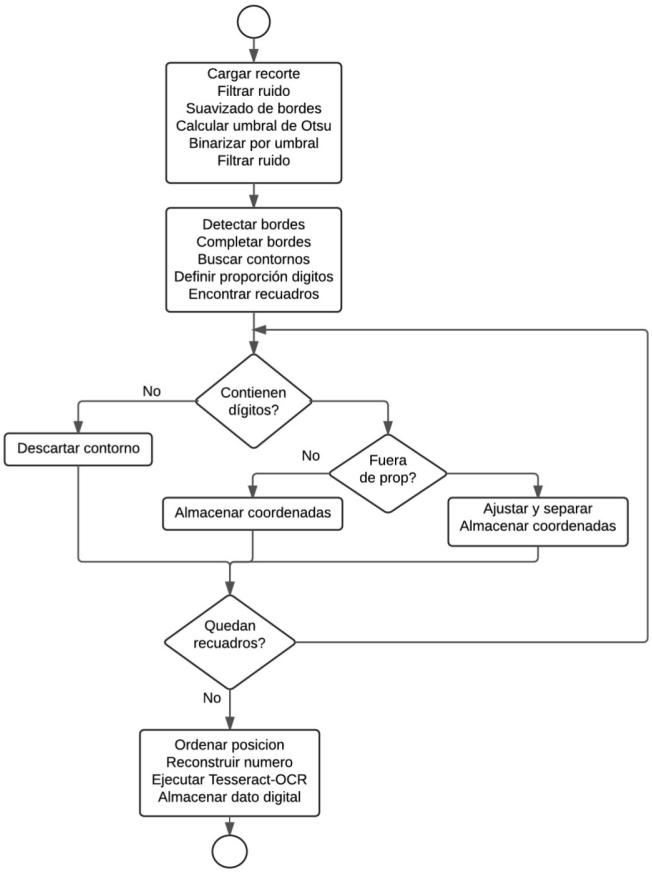


Fig. 10. Diagrama de flujo para la identificación de dígitos

ruido y realzar los bordes. La binarización no se puede realizar con el mismo valor de umbral para cualquier imagen, porque las variaciones de luz hacen que se puedan perder regiones durante el proceso. Para solucionar este problema se utiliza el algoritmo de Otsu, que calcula para cada imagen en particular, el valor óptimo de umbral para binarización.

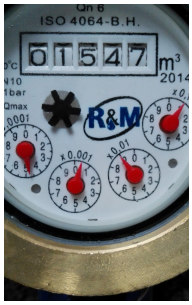


Fig. 11. Figura para ilustrar el proceso de reconocimiento de dígitos

La figura 12 muestra el proceso que se aplica a la sección recortada, en donde en en la Fig. 12.a se observa el resultado de aplicar la binarización con el umbral de Otsu. En esta figura se aprecian claramente los dígitos pero existen algunas zonas con ruido producto de las sombras y bordes en cada posición. En las figuras 12.b y 12.c se aplica el detector Canny para exponer los bordes existentes y con la transformación morfológica se consigue cerrar las pequeñas discontinuidades en las líneas que forman el contorno de los dígitos. Finalmente, en la Fig.12.d se detallan los recuadros delimitadores de cada número. Para seleccionar el recuadro adecuado se realizó una parametrización del área que en promedio ocupa un dígito con respecto al tamaño total del recorte.

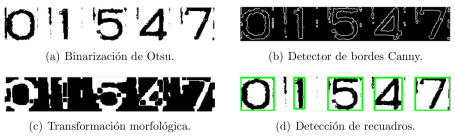

(a) Binarización de Otsu.
(b) Detector de bordes Canny.
(c) Transformación morfológica.
(d) Detección de recuadros.

Fig. 12. Resultado de las operaciones sobre el recorte extraído de la Figura 11

De acuerdo con mediciones experimentales se determinaron los siguientes criterios para ser considerado como dígitos válidos:

- Altura mínima: Al menos el 70% de la altura del recorte.
- Ancho mínimo: Al menos el 10% de una quinta parte del ancho total del recorte.

– Ancho máximo: A lo sumo la quinta parte del ancho total del recorte.

El ajuste logra descartar las zonas de ruido que se observan entre 0 y 1 y entre 5 y 4, las cuales no habían podido removerse por medio de filtros.

Debido a la implementación interna que utiliza OpenCV [2] para buscar los contornos, estos se localizan iniciando desde el fondo de la imagen (abajo) y avanzando hacia el tope (arriba). Por tal motivo, no siempre el primer recuadro encontrado será el primer dígito a la izquierda. Para evitar malinterpretar el orden de las cifras se utiliza un ordenamiento por medio de la posición x de cada recuadro, así las coordenadas de los recuadros encontrados se utilizan para recortar cada dígito y generar una imagen independiente para cada uno. Luego éstas imágenes se mezclan con un espaciado uniforme de manera que el resultado tenga mayor similitud con un sólo número compuesto por varias cifras.

En la figura 13 se muestra como se almacenan los dígitos en imágenes separadas, en este caso el nombre de cada imagen indica la posición en el número original. La construcción de la nueva imagen mostrada en la figura 14 evidencia la efectividad del tratamiento del recorte.



Fig. 13. Dígitos separados y clasificados según su posición en la imagen



(a) Recorte original. (b) Recorte preparado para OCR.

Fig. 14. Comparación entre los recortes originales y los procesados para la identificación de los dígitos

De esta forma, se han aislado las figuras de cada dígito, eliminado los espacios blancos entre cada cifra y reducido parcialmente el efecto de las sombras cercanas a los bordes.

El recorte de la figura 14.b se utiliza como entrada para Tesseract-OCR, el cual realiza el reconocimiento de los caracteres numéricos. Por defecto, los resultados obtenidos se exportan a un archivo de texto que se escribe en la misma ruta de acceso a la imagen de entrada. El contenido del archivo después de ejecutar el reconocimiento se muestra en la figura 15.

La digitalización del dato se completa convirtiendo el texto generado en una variable de tipo numérico (int, float). Esto es necesario para eliminar dígitos no significativos y espacios. Por ejemplo, en este caso el número inicia con un 0 que carece de relevancia así que se suprime junto con el espacio blanco detectado.

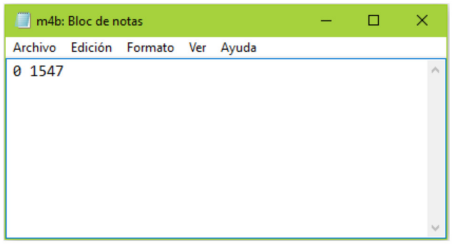


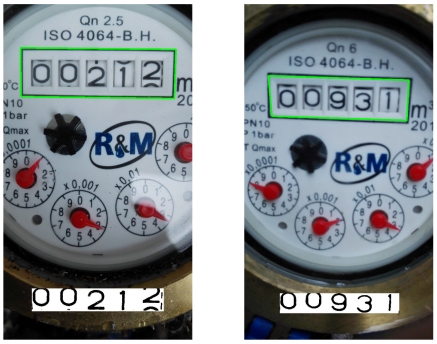
Fig. 15. Archivo de texto con los resultados de reconocimiento

4 Dificultades encontradas en el procesamiento de imágenes de medidores de agua

Con el objetivo de validar el proceso de reconocimiento de imágenes se tomaron fotografías de varios medidores de agua ubicados en el campus del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Las imágenes que se muestran en la figura 16 resume los tipos de casos encontrados.

A continuación se describirán los desafíos que representan cada uno de estos casos.

- Figura 16.a: En esta situación el algoritmo tiene la capacidad de reconocer correctamente los dígitos que se encuentran centrados o cuyo desplazamiento es aproximadamente igual o menor al 10% de la altura total del número. (porcentaje determinado de manera experimental tomando medidas de los desplazamientos tolerados y los que inducen a error).
  El dato numérico obtenido al procesar este recorte fue 215 tal y como se muestra en la Figura 17, es decir el único dígito incorrecto es el último a la derecha. En la imagen se puede apreciar que el error es introducido por la porción del siguiente dígito (3) que aparece desde la parte baja.
- Figura 16.b: Aquellos casos donde el medidor se encontraba ligeramente rotado no presentaron problemas para concretar el reconocimiento de forma satisfactoria. Este es un escenario totalmente controlable ya que depende de como se efectúe la instalación del dispositivo. Aunque no haya generado errores, al colocar la cámara se debe verificar que tenga la orientación correcta. El resultado obtenido en este caso es el dato numérico 931 (Figure 18) que corresponde con certeza al observado en la respectiva figura. Cabe destacar que el dígito 3 se encuentra ligeramente desplazado hacia abajo. Sin embargo, al no haber ingresado parte del siguiente número este factor no afecta la eficiencia del reconocimiento.
- Figura 16.c: En esta figura se nota que la sombra producida por el marco de los dígitos se superpone en la parte superior de las cifras 6 y 3. Además. el dígito 3 se encuentra desubicado de su posición normal lo cual ocasiona que se perciban agujeros negros junto al extremo derecho. A la hora de binarizar



(a) Medidor con un dígito desplazado.

(b) Medidor ligeramente rotado.

(c) Medidor con sombras entre números

(d) Medidor en posición ideal

Fig. 16. Tipos de casos posibles en la captura de imágenes de medidores de agua

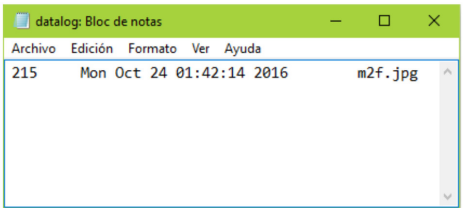


Fig. 17. Resultado del reconocimiento aplicado al recorte en la figura 16.a

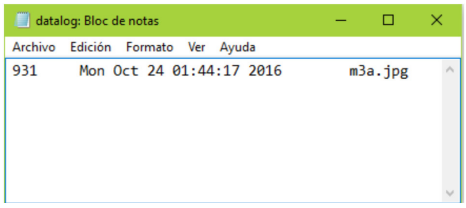


Fig. 18. Resultado del reconocimiento aplicado al recorte en la figura 16.b

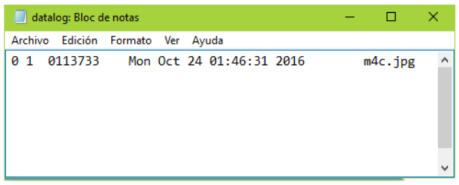


Fig. 19. Resultado del reconocimiento aplicado al recorte en la figura 16.c

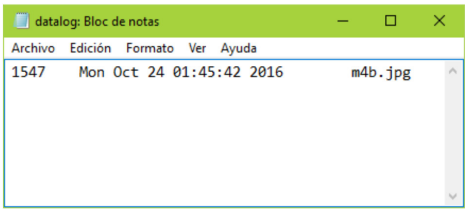


Fig. 20. Resultado del reconocimiento aplicado al recorte en la figura 16.d

el recorte esto provoca que se mezclen zonas de ruido con el contorno del dígito y sea irreconocible.
Como se puede apreciar en los resultados de la identificación mostrados en la Figura 20, similar al caso de la Figura 16.a el reconocimiento acierta en los dígitos ubicados adecuadamente y falla en 6 y 3 donde el resultado es completamente inconsistente.
El error es producido por las sombras que crea el marco de los números. Aunque en los casos de las figura 20.b y 20.d también se percibe esa misma sombra, en esos casos no se traslapa con la figura de los dígitos.

– Caso mostrado en figura 16.d: Este es el caso que se utilizó como ejemplo en la sección anterior. Este es el caso en donde lo dígitos del medidor se encuentran en una posición adecuada para hacer el reconocimiento. El resultado de esta digitalización se aprecia en la Figura 15.

5 Conclusiones y trabajo futuro

El presente trabajo ha presentado una propuesta de sistema de medición de bajo costo que se puede integrar fácilmente a los medidores analógicos de bajo costo y robustos de los que disponen varias ciudades de países de bajo y medio ingreso. Se demostró que es posible identificar el dato de medición de estos medidores por medio de la imagen de la carátula de un medidor utilizando una cámara de bajo costo con una resolución de 640x480 píxeles.

También se logró identificar factores que imposibilitan la medición correcta de los medidores. Estas mediciones incorrectas pueden ser identificadas por medio de datos históricos y algoritmos de inteligencia artificial. Éstas últimas tareas representan las próximas etapas que se estarán desarrollando en este proyecto.

References

1. Ankur Ravindra Bodhe, Rahul Singh, and Abhishek Bawa. An internet of things solution for sustainable domestic water consumption. In *Computation System and Information Technology for Sustainable Solutions (CSITSS), International Conference on*, pages 224–229. IEEE, 2016.
2. Gary Bradski and Adrian Kaehler. *Learning OpenCV: Computer vision with the OpenCV library.* " O'Reilly Media, Inc.", 2008.
3. Liting Cao, Jingwen Tian, and Yanxia Liu. Remote real time automatic meter reading system based on wireless sensor networks. In *Innovative Computing Information and Control, 2008. ICICIC'08. 3rd International Conference on*, pages 591–591. IEEE, 2008.
4. S-C Hsia, S-W Hsu, and Y-J Chang. Remote monitoring and smart sensing for water meter system and leakage detection. *IET Wireless sensor systems*, 2(4):402–408, 2012.
5. Shih-Chang Hsia, Ming-Hwa Sheu, and Yu-Jui Chang. Arrow-pointer sensor design for low-cost water meter. *IEEE Sensors Journal*, 13(4):1281–1287, 2013.
6. Hiesik Kim and Odgerel Ayurzana. Improvement of data receive ratio in remote water meter system by upgrading sensor. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 7(1):145–150, 2009.
7. Kyong-Ho Kim, Sung-Il Chien, Yong-Bum Lee, and Kwang-Soo Kim. Analog and digital meter recognition using computer vision. In *MVA*, pages 51–54, 1996.
8. Chanda Rajurkar, SRS Prabaharan, and S Muthulakshmi. Iot based water management. In *Nextgen Electronic Technologies: Silicon to Software (ICNETS2), 2017 International Conference on*, pages 255–259. IEEE, 2017.
9. WenYan Wu, JinLiang Gao, Ming Zhao, XQ Hou, Y Han, et al. Assessing and optimizing online monitoring for securing the water distribution system. In *Networking, Sensing and Control, 2007 IEEE International Conference on*, pages 350–355. IEEE, 2007.

Dynamic Building Information Modelling with digital cameras

Francisco Delgado-del-Hoyo[1] and Javier Finat[1]

University of Valladolid.
Campus Miguel Delibes, Paseo de Belén, 11. Valladolid, 47011, Spain,
franciscojavier.delgado@uva.es,
https://www.mobivap.es

Abstract. Smart Cities advocate for an ecosystem of connected devices that produces information faster than it is consumed. On the Architecture Engineering Construction (AEC) industry, Building Information Modeling (BIM) proposes a collaboration between different stakeholders around the same building model. This collaboration extends beyond the design and construction of the project so it should also include monitoring, maintenance, and refurbishment. These tasks would benefit from an integration of dynamic information in the building model. This information can be provided, for example, by sensors distributed distributed across the city (Internet of Things (IoT)). Then, we speak of dynamic Building Information Modeling (BIM), an extension where evolving data is represented by flows. In particular, digital cameras are one of the most ubiquitous types of sensors. They allow any user to quickly produce dynamic information by capturing a video sequence that can also generate three-dimensional point clouds. Dynamic data can be tracked along time for monitoring purposes and used to infer/simulate new situations for decision making. The main purpose of this paper is to describe our framework for dynamic BIM based on a spatio-temporal representation of flows. We have also implemented a three-dimensional visualization tool called 3D-SIMOS that runs both in mobile and in desktop environments thanks to WebGL. 3D-SIMOS also showcases the advantages for the stakeholders in the AEC industry of using the BIM methodology.

Keywords: Tracking, Simulation, Dynamic BIM, Computer Vision, Advanced Visualization, Internet of Things

1 Introduction

Smart cities [21] are urban areas where several interconnected agents supply real-time information to manage assets and resources efficiently. Data can be collected from citizens, sensors, and assets to monitor traffic, climate, utility networks, and community services. The goal is to optimize the efficiency of city operations and services. Furthermore, city administrators can interact directly with both community and infrastructure to monitor how the city is evolving.

The idea of a network of interconnected physical devices is part of the Internet of Things (IoT). Vehicles, home appliances, and any electronic device can be connected to exchange data with their peers. A collaborative design creates opportunities for new computer-based applications that benefit from the real-time flow of information provided by these devices. However, this information is usually structured in different and incompatible data sources. In the best case, it follows a predefined schema or data model, which can be annotated with semantic information from an ontology. Ontologies are an evolution of conventional data models that provide a richer conceptual framework to infer new relations between terms. They also can be mapped to other ontologies using different automatic or manual ontology matching procedures [9]. These mappings allow applications to discover new information linked to external sources to infer more advanced knowledge.

In the last decade, Building Information Modeling (BIM) has emerged as a new paradigm for the Architecture Engineering Construction (AEC) industry. The BIM methodology proposes that all the stakeholders involved in a building project collaborate around a shared building model. At the same time, it proposes a format to represent such model, the Industry Foundation Classes (IFC), which can be considered an ontology. As we have mentioned in the previous paragraph, ontologies can be aligned to collect more information than the one they directly represent. In this way, IFC can be augmented with external data coming from smart cities that it is not directly modeled. Dynamic data is one of these pieces of information not directly described by the IFC.

The dynamic information corresponds to attributes or properties of the building that evolves with time. In conventional representations, it is modeled with a single scalar value that can be eventually edited, but these changes are not registered. Our aim is to include over BIM the required mathematical concepts to represent this dynamic information to enable continuous/discrete analysis of processes in which the building is involved.

Three-dimensional information surrounds us nowadays. Nevertheless, it is not easy to capture this information since the most accurate devices are not affordable. Fortunately, robotics community has developed alternative and more efficient methods in Simultaneous Localization and Mapping (SLAM). They can be adapted to develop easy-to-use affordable applications that capture snapshots of 3D environments, which can be continuous (i. e. meshes) or discrete (i. e. point clouds). The generation of latter is more straightforward, but the result is not visually appealing. However, point clouds provide an excellent support to monitor the evolution of 3D scenes. Such evolution can be linked to the building model, as we will show in section 4. Here, we aim at providing efficient lightweight 3D reconstruction methods to monitor the state of a construction.

In this paper we extend the framework introduced in our previous work [6] to include dynamic representations of three-dimensional discrete data. This data is represented by point clouds that can be aligned with the reference building model to track the progress of the processes executed on the building during its lifecycle.

The rest of the document is organized as follows: section 2 is devoted to introducing current approaches to dynamic BIM and vision-based tracking; section 3 describes thoroughly our proposal to manage dynamic information over a graph-based representation like IFC; section 4 intends to integrate the dynamic 3D information produced by different types of sensors in a Smart City into the previous representation; section 5 introduces 3D-SIMOS, our implementation of the previous framework to visualize, inspect and simulate constructive processes around a BIM project created from conventional Computer-Aided Design (CAD) sources; finally, section 6 summarizes the advantages and drawbacks of our proposal, providing guidelines for future developments.

2 Background

This section is intended to give the reader a better understanding of the basic concepts involved in the our research framework, at the same time that basic bibliographic references are provided.

The transition of the AEC industry from entity-based models to object-based models (i. e. BIM) is part of the Industry 4.0. In BIM, the stakeholder work around shared information [8], which can be exchanged through the IFC format. Despite its apparent benefits, many organizations are reluctant to adopt this new methodology due to the complexity and the required investments.

The addition of dynamic information has been addressed by the Geographic Information System (GIS) community in the last decade. For example, in [14], the authors propose EDGIS for managing temporal information over traditional static GIS. They create a spatio-temporal data structure called the Space Time Point (STP) to retrieve meaningful information about dynamic phenomena in data queries. They also designed a dynamic GIS interface to execute such queries.

The problem has also been tackled in the BIM domain. The addition of real-time building information is useful for facility management since managers can reach accurate information about the state of systems. Sensor data has been integrated into the IFC with this goal in [4]. The authors showcased their approach in a geothermal bridge deck deicing system with embedded temperature sensors. Sensor data is fused and processed for visualization through the development of new add-ins in Revit. Hence, they create a vendor-locked approach that only supports scalar variables represented by time series.

A more abstract approach was provided by [18]. They noticed the lack of connectivity between BIM and other tools for a performance analysis of the building. So, they defined the D-BIM Workbench, an open source framework to conduct integrated building performance assessments. The Workbench can be tailored to specific domains such as energy efficiency or environmental/economic impact. For example, they allow users to study Net Zero Energy (NZE) environments including a 3D heat transfer function.

Three-dimensional reconstruction of the environment can be achieved by using different types of devices, which may be based mainly in two types of sensors: active and passive. The former ones (e. g. laser scanners) are more expensive

and accurate; the latter ones are affordable and noisy (e. g. binocular cameras). Other devices combine both of them (e. g. RGB-D cameras). An affordable 3D reconstruction should consider the most simple and ubiquitous sensor: a digital camera. A video sequence recorded with a single camera traveling around a scene provides enough information to recover a 3D map of the environment. These techniques have been studied by the robotics community in SLAM and Visual Odometry (VO) [16].

More specifically, SLAM is the process of estimating the position and orientation of a camera in an environment at the same time that the map is being reconstructed. As a result of this process, a sparse point cloud is generated. There exist robust solutions to deal with most types of cameras and sequences [10,12]. They can also be deployed on mobile devices to provide ubiquitous 3D reconstruction capabilities in the IoT.

3 Dynamic information modeling

In this section, we are going to explain how traditional representations for static information can be extended to include dynamics, i. e. information that changes along time.

Dynamic information involves evolving models that are able of incorporating causality principles (forces and moments in the classical case). Hence, it goes farther than usual evolving descriptions for urban environments along time, that could be interpreted in terms of kinematic models. The incorporation of causes is modeled by using differential and integral relations between flows involving the evolution of different quantities.

Hence, dynamic information can be managed as an additional layer that is superimposed to a symbolic representation of the building based on a graph-like structure, as we described in [6]. This representation allows us to define a global framework in which objects and different kinds of functionals can be integrated.

3.1 A kinematic representation

The main goal of kinematics is the evaluation of variations of functional or geometric quantities along a temporal sequence. In order to achieve this goal, it is necessary to introduce local generalized coordinates $\underline{x} = (x_1, \ldots, x_n)$ (labeled as independent variables) and functions $f_j(\underline{x}, t)$ for $1 \leq j \leq p$ (labeled as dependent variables) for control points. Furthermore scalar and vector fields, one can introduce differential forms to represent multivector quantities representing the evaluation of functionals on spatial entities. The time evolution of such "quantities" can be described in terms of temporal trajectories $\gamma_a(t)$, where a can represent meaningful points, spatial entities or attributes of agents and/or building spaces (e. g. installations).

Several scalar functions can be statically grouped with the map $F = (f_1, \ldots, f_p) : \mathbb{R}^n \ldots \mathbb{R}^p$, which provides a snapshot of the current state as an element of an ideal configurations space. From a kinematic viewpoint, it is more appropriate to

introduce a finite collection of vector fields ξ_h to represent properly the coupling between the scalar fields $f_j(\underline{x})$ which are interpreted as "functional coefficients" of a simultaneous evolution of systems along the space-time. By replacing ordinary vector fields with Markov fields one obtains a more flexible approach which is compatible with uncertainty about available data and their evolution.

Covariance matrices for any kind of (in)dependent spatial variables can be reinterpreted in terms of "local curvatures" representing the "lack of elasticity" of the environments w.r.t. perturbations. Eigenvalues of the covariance matrix provide estimators for the principal curvatures representing local extremes in regard to propagation phenomena. In particular, vanishing local curvatures means that space is "flat" along the corresponding directions. On the contrary, high curvatures indicate a "rigidity" of the environment w.r.t. possible modifications. These remarks can be applied to the source/target space of maps F or to the vector distributions $\mathcal{D} = (\xi_1, \ldots, \xi_h)$ that describe the evolution of fields along time and space. Both scalar and vector fields provide a representation of flows on the urban space. They are evaluated in our framework in dual terms, i. e. using systems of differential forms to obtain numerical values for each finite collection of fields which simplify information management (including detection, extraction, tracking and simulation).

3.2 Sources of dynamic data

Dynamic information can be generated mainly by two types of sensors in the IoT framework:

- *Range-based sensors* provide numerical data for a scalar variable, which can be managed in terms of time series, i. e. a discrete representation of a scalar field.
- *Image-based sensors* provide vector data associated with evolving planar or volumetric information projected on the sensor (e. g. digital cameras). Video sequences represent a typical example of vector fields.

Certain devices (e. g. 3D scanners) include both types of sensors to fuse information about the perceived space. Usually, these devices produce redundant information that must be removed in a preprocessing step to be useful. Preliminary filters can be applied to remove noise. Then, a posterior step clusters data with a combination of thresholding and average value selection with K means, modes or medians. The obtained decomposition is a disjoint union of regions displaying a similar behavior. Such decomposition is a *local segmentation* of the data captured by the sensor, which is more manageable and lightweight.

4 Dynamic 3D reconstruction

This section is specifically focused on three-dimensional information capture and representation when this information changes over time. The tracking of these models along time slices of variable length poses a significant challenge.

Automatic three-dimensional reconstruction procedures have achieved impressive performance in state of the art. However, despite the advances for clustering and fusing information arising from range- and image-based sensors, a fully automatic 3D reconstruction requires an interpretation of geometric primitives (involving constructive elements) and radiometric primitives (involving materials). A smart management of both of them will allow in the future to predict their behavior along time and under different kinds of efforts linked to structural statics and environmental conditions.

In the meantime, we develop partial approaches which use some advances for semi-automatic representation of existing environments, and are able of incorporating modifications from interventions that are understood as a flow. An astonishing feature of dynamics is the capability of generating effects in additional dimensions where they are holding. The simplest examples for planar representations are given by momenta (vector product of two vectors in a plane generate a vector outside the plane) that can be physically reinterpreted (similarly to the feedback beetwen electrical and magnetic fields).

In a similar way, architectural or engineering interventions along building processes, generate dynamic aspects which involve the whole structure in a dynamic way. Evolving volume forms provide the natural extension of the precedent planar approach. Their control is a crucial issue to optimize the use of external resources according to internal and external constraints involving the whole object and their relations with its environment. In a first approach, the control of their evolution along time is performed by based-model tracking and predicting tools supported by field flows.

4.1 Tracking sparse 3D models

Buildings are commonly represented using Piecewise Linear (PL)-linear volumetric decompositions. However, these models created manually at design time greatly differ from those generated by a 3D reconstruction procedure. For example, video-based 3D reconstruction produces noisy results in form of sparse point clouds. These clouds must be aligned with the original model using 3D registration algorithms, such as the one presented in [2]. Once information is registered in the same frame, the evolution or changes must be represented in a differential way, i. e. using a differential operator δ for (co)vector fields. The use of this operator allows to relate not only elements of different dimension in AEC environments, but relations between fields and/or operators.

In most applications to real world, one must discretize all the information relative to physical elements and operations with them. Grouping of discrete data in spatial entities and operators on linked discrete representations are easily managed in symbolic terms by using (sub)graphs and functionals defined on (sub)graphs whose nodes represent spatial entities. A formal treatment to identify and classify functionals defined on spatial entities can be performed in topological terms (by using co-homology of graphs) to obtain basic patterns to be shared by different agents.

A regular partition of the space using a grid structure helps to discretize the representation. This strategy is similar to the method proposed by [19] for compression of 3D point cloud sequences. In this paper, the authors represent the time-varying geometry with a set of graphs and consider 3D positions and color attributes as signals on the vertices of the graphs. The motion is estimated on a representative subset of the vertices using spectral graph wavelet descriptors. The dense motion field is interpolated to remove the temporal redundancy along the sequence in the point cloud data.

If continuous 3D information would be required, a textured 3D mesh can be obtained by triangulating the cloud and fusing partial results in a volumetric grid [5]. This supplementary step is usually performed after the video sequence has been recorded and the trajectory has been optimized. Thus, the optimizations introduced in the camera pose of the keyframes help to achieve more accurate 3D models. These models are composed of a triangular 3D mesh and a texture which is projected onto the mesh.

4.2 Updating constructive processes

The 3D static information tracked in the previous step can be matched against the building model shared among different AEC stakeholders following the BIM methodology. The state of constructive processes from low-cost cameras (e. g. cameras of smartphones) can be tracked using SLAM methods. These methods produces point clouds that can be aligned with the general reference of the building. This alignment is performed using features of the points extracted from the images from which they are observed. These features correspond to maximum intensity gradients and allow the system to detect corners and borders (i. e. salient points). These very basic geometric primitives can be compared with the designed model using a strategy similar to [15]. The main benefit from SLAM is that we can use the same algorithms to map and track the scene, as it has been recently shown in [12] (see e. g. Figure 1).

Once the matching between the point cloud and the BIM model is performed, the progress of the construction is measured as the percentage of volume matched between the point cloud and the model. The same point cloud serves as a checkpoint to document and monitor the construction processes. In most cases, it is impossible to achieve a complete matching since both models have a low degree of overlap between them. The comparison can be performed using Iterate Closest Point (ICP) algorithms over a Random Sample Consensus (RANSAC) scheme (see [20]) that returns the best transformation in terms of accuracy and completeness. For example, we can generate point clouds of a refurbishment that can be aligned with the reference model even though the refurbished constructive elements of the building do not match. The point cloud of the refurbishment allows the user to document the intervention as a checkpoint in the building lifetime. The same happens with point clouds captured in early stages of the construction process. We match the point cloud of the built part of the building (e. g. the first floor of the building) against multiple combinations of consecutive stages



Fig. 1. The point cloud of a desktop generated by SLAM methods. In addition, this point cloud allows the system to determine the camera position on future trajectories.

as detailed in the initial planning. Then, we chose the most accurate matching to align the point cloud with the reference model.

There are mainly two approaches to SLAM methods: sparse and dense. From our experiments we have determined that robust operation in low-cost cameras is only feasible using keypoint-based (or sparse) techniques. However, dense or semi-dense techniques deliver more visual appealing point clouds (i. e. with more points) with more complex cameras (e. g. cameras equipped with rolling shutter and a wide field of view).

4.3 Towards a geospatial intelligence

The increasing quantity of real-time geospatial information poses multiple challenges regarding the provision of customized services to different kinds of agents. This challenge also demands the integration of tools for analyzing, visualizing and monitoring urban environments. Such information is generated by multiple sensors communicated in real-time.

Sensor information is useful for detecting mobility issues concerning environmental conditions in urban and/or metropolitan areas. This environmental information can be modeled as flows linked to scalar and co-vector fields so that we can impose different constraints concerning their spatio-temporal evolution. The 3D model of the building provides a common reference to integrate the information provided by sensors. The Phase Space (Poincaré) can be used to support the dynamics of evolving information (see [17]).

The use of scalar fields for point clouds is not a novelty. In [3], the authors prove that the topological persistence of the underlying PL-structure provides a stable support for functionals. Currently, we have proposed only a more flexible model for vector fields relative to meaningful data of clouds. This is justified because the simultaneous tracking of evolving characteristics linked to an evolving clouds of points is out of reaching.

More explicitly, the kinematic tracking is performed in an incremental way, by fusing the information of a finite number of control points $\mathbf{p}(t_i)$ corresponding to meaningful features. Kinematic information relative to the evolving point at three consecutive times is denoted as $\mathbf{p}(t_{i-1})$, $\mathbf{p}(t_i)$ and $\mathbf{p}(t_{i+1})$. First order differences $\mathbf{v}_i := \mathbf{p}(t_i) - \mathbf{p}(t_{i-1})$ and $\mathbf{v}_{i+1} := \mathbf{p}(t_{i+1}) - \mathbf{p}(t_i)$ provide a coarse approach to the speed of the control point $\mathbf{p}$. Similarly, second order differences $\mathbf{a}_{i+1} := \mathbf{v}_{i+1} - \mathbf{v}_i$ provide a discrete coarse approach to the acceleration of the control point $\mathbf{p}$ at instant t_{i+1}.

Our approach generates a finite collection of trajectories that can be interpreted as the integral curves of vector fields representing the motion on the image plane. By extending this construction to a finite number of tracked points $\mathbf{p}_j$, a bundle of trajectories $\gamma_j(t)$ is obtained. By clustering the trajectories that displays a similar kinematic behavior, a reduced number of distributions of vector fields $\mathcal{D}_k$ can be found.

5 Advanced Visualization in BIM

We have devoted this section to explain how dynamic information (see section 3) can be integrated with three-dimensional information (see section 4) in a common shared model following the BIM methodology.

Advanced Visualization is the process that transforms the symbolic into the geometric, enabling researchers to discover profound and unexpected insights. This science introduces a natural hierarchy to represent processes using different kinds of fields [11]. By following an increasing order of difficulty, this hierarchy is composed of scalar fields (functionals taking values in the real numbers $\mathbb{R}$), distributions of vector fields (or systems of differential forms for the dual representations), and tensor fields (treating scalar, vector and covector fields in a simultaneous way). In [6], we describe 3D-SIMOS, a web application for simulating and visualizing constructive processes in BIM. We evaluated our results in a model for the famous Fallingwater house to demonstrate the potential of BIM also in singular buildings.

From a theoretical viewpoint, these fields admit discrete versions in terms of PL-approaches to solutions. They have been applied to several areas, such as computer vision and computer graphics, but not still to the AEC. The use of products of co-vector fields (numerical evaluation of vector fields) is motivated by two reasons:

1. Installations or wired structures are the support of differential 1-forms and their growth is represented by 1-parameter families (pencils) of PL-vector fields;

2. walls, floors, and ceilings provide the support for 2-parametric families (nets) of differential 2-forms;
3. volumetric cells are bounded by 3-parametric families (webs) of differential 3-forms

All of them are evaluated on integrable kD distributions of functionally-independent pair vector fields representing tasks to be developed on the corresponding geometric support. Exterior differential calculus relates differential forms of different degree; exterior product and contraction of a differential form along a field provide the initial keys to perform these operations.

From a more practical viewpoint, constructions processes are connected to evolving geometric primitives representing the spaces of the building. This connection is obtained by clustering data obtained from surveying cameras in constructive environments. This idea is well known and largely used to monitor static environments. The novelty here is the focus on automation using fields. In the case of scalar fields, critical events are associated with different stages in constructive processes or, alternatively, are used for evaluating environmental conditions concerning the safety of the process. This reasoning scheme can be adapted to other co-vector or tensor fields, by using a discriminant analysis for the dependency locus of the space of such fields in the differential framework, or for the multivariate analysis from the statistical viewpoint.

Discrete fields are a PL-representation of flows, which can represent dynamic processes or events linked to the geometry of the building. These fields are referenced to the support given by the building model in the same way as point clouds are. So any point cloud is equally affected by the processes described by the flows. On one hand, each point of the cloud representing the building is attached to the closest point of the corresponding field. On the other hand, two point clouds captured at consecutive time steps also define a reducerd finite collection of three-dimensional fields representing the motion flow for the whole scene. This field is defined by a regularization of the distribution of distance vectors between tracked points; distance vectors are evaluated from the position of the extracted points in the initial cloud for each sequence.

Therefore, captured point clouds are not representing flows by themselves; instead, they serve as an anchor, reference or proxy for fields linked to that flows. The main reason is the lack of regularity for the distribution. Furthermore, it is worth mentioning that points of the cloud or meshes of the CAD model are not directly updated by flows; instead we concatenate the chain of flows acting over each point and apply it to get the final position or state of the building.

5.1 3D-SIMOS

Despite the apparent benefits of BIM, stakeholders involved in the AEC industry are still reluctant to adopt the BIM methodology. Advanced Visualization can be used to illustrate these benefits by showing how several stakeholders can inspect and showcase the same building model at the same time. In our interviews

with the involved stakeholders, we have identified a set of common requirements concerning BIM:

- The BIM model should be easy to create from traditional CAD file formats. The model should include the geometry (in COLLAborative Design Activity (COLLADA) [1]) and the planning of the building (in Microsoft Project Plan (MPP)[1]).
- The system should recognize layers, objects and transformation groups involving shape changes, in the COLLADA format. The layers must be linked to the stages of the planning interactively.
- The building model should be visualized and inspected in a three-dimensional viewport in any WebGL-capable browser[2]. The camera is managed using orbit controls to translate, rotate and scale the model.
- The stages of the construction can be selected and enabled. Changes in their state are synchronized bidirectionally with the geometry.
- The whole construction process can be simulated with a progressive display of the geometry associated with the construction stages.

We have gathered these requirements to develop a simple application called 3D-SIMOS[3] (see Figure 2), in an effort to illustrate the advantages of using the BIM methodology. It has been developed as a web application to allow the user an ubiquitous interaction with the model. A few years ago, we would have to rely on a specific plugins for rendering 3D content in the web browser or just develop a native application. However, 3D-SIMOS is based on the recent WebGL specification published by the Khronos Group, which allows us to render the three-dimensional building models directly within the browser, without installing any additional third-party plugin or dependency. WebGL interface redirects any drawing request to the graphic hardware of the device, which is responsible for rendering the contents in the canvas created by the web application. This way we have access to native hardware acceleration in graphics that boost the performance of the application, especially in cases where highly-detailed models are required.

The main functionalities of 3D-SIMOS include the simulation of a construction process with Spherical Linear Interpolation (SLERP) around the center of the model. This showcases the appearance of the building to interested user at the same time that it provides a basis for tracking the progress of the construction. The tracking is performed spatially (i. e. matching the 3D information as in subsection 4.1) or temporally (i. e. using the current timestamp to measure the state of the construction).

Our evaluation with the stakeholders involved in the project shows that the rendering quality should be improved to showcase the building but the ease of use of the application is something remarkable.

[1] https://fileinfo.com/extension/mpp
[2] https://www.khronos.org/webgl
[3] https://simos3d.mobivap.es

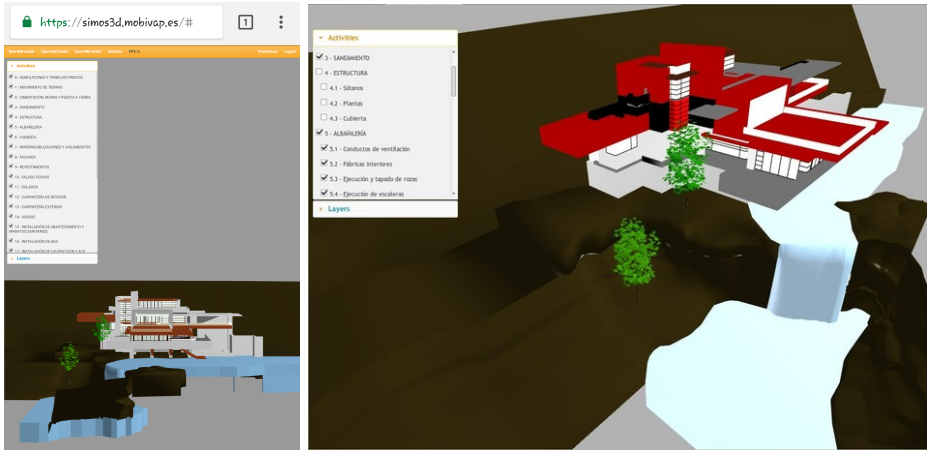


Fig. 2. 3D-SIMOS running in Google Chrome web browser in a Galaxy S6 and a desktop PC. The planning is shown in a tree widget where the user can select/enable/disable each task to inspect the geometry of the model affected by such tasks.

5.2 Interoperability with BIM

The IFC schema defined for BIM provides a formal representation of knowledge, commonly known as *Ontology*. In order to make them more simple, ontologies are always focused on a specific domain of knowledge and scope. However, it is necessary to reconcile two or more ontologies for certain tasks like integration. This process is called *Ontology Alignment* or *Ontology Matching* [9].

Due to its wide scope, the IFC provide an excellent framework to embed information from other sources, specially those related with geospatial and sensor information. In a precedent work [7], we have studied the feasibility of performing an automatic alignment between five well-known ontologies concerning geospatial and building information. These techniques are based on comparing the string of the thesaurus, the structure of the schema or the taxonomy. Best results show that a precision of around 60% can be reached. However, the recall was still low, showing that a manual alignment is required if accurate results are mandatory.

In 3D-SIMOS we have developed a manual alignment between the schemas of COLLADA, MPP and IFC. This mapping allows the system to bootstrap a BIM model using just conventional CAD sources. Figure 3 represents the mappings defined between a subset of concepts included in the involved schemas that are semantically equivalent.

The problem can be tackled from the Machine Learning perspective using Natural Language Processing (NLP) techniques (see e. g. [13]). These techniques can be useful for matching several schemas representing urban environments that are related with the IFC. Bridging the gap between different model representations is another way to integrate semantic information concerning the building.

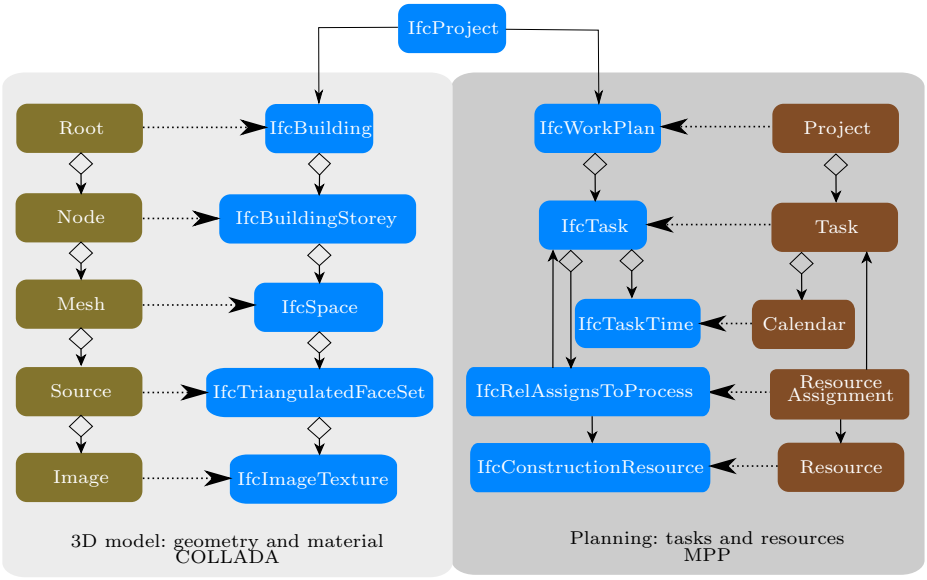


Fig. 3. An ontology alignment between equivalent classes in the schemas of COLLADA, MPP and IFC. We have only mapped the concepts that can be integrated into the IFC schema. This mapping allows 3D-SIMOS to embed CAD and planning information from different sources into a single shared BIM model.

5.3 Advantages

Our approach for information management in dynamic models includes evolving features affecting different topics and fields. This is the reason because it is difficult to present a fair comparison with the state of the art. However, we think it is worth to highlight the main benefits it introduces:

- Information from different sources and devices can be fused in a single common dynamic framework.
- Time progress is explicitly modeled to go further static details and to improve monitoring.
- Discretization of information allows us to efficiently store data in an incremental way since we are only representing differences between consecutive snapshots.
- All the information is aligned w.r.t. a reference model following the BIM philosophy.
- The framework is extensible and scalable: data can be distributed in separated silos since any resource can be identified by its Uniform Resource Identifier (URI).
- Visualization tool does not require installation since it is a web application, and supports multiple devices since WebGL allows the application to render 3D graphics on the web browser.

6 Conclusions and future work

In this work, we have introduced a unified framework for BIM that integrates the information arising from different types of sensors in the Smart Cities paradigm. This information can include three-dimensional models generated with commodity cameras that travel around the environment to digitalize it. The framework also supports kinematic information represented by PL-fields (for evolving data) and PL-forms (for linear functionals defined on geometric primitives linked to constructive elements). In order to ease monitoring, tracking and simulation of new situations for decision-making purposes, different kinds of fields are supported too. In particular, dynamic events are represented by flows, which are discretized by fields. We have showcased this framework in a web-based application called 3D-SIMOS that takes advantage of WebGL to operate in any web browser both on mobile and desktop computing environment. At the same time, the application allows stakeholders of the AEC industry to inspect, visualize and simulate the progress of the constructive processes. This way they can evaluate the advantages of the fundamentals of the BIM methodology, which aims to foster its adoption.

Future work includes the extension of the framework to represent complex interactions between mobile agents and their surrounding environment in the city. These extensions should append functionals to evaluate Energy Efficiency at an urban district level. This would require to reformulate classical principles of Thermodynamics for open environments (in exergetic terms) with the aim of incorporating dissipation phenomena based on the characteristics of the environment.

Other meaningful topics for future research concern the mobility in the city of citizens and vehicles taking into account the environmental conditions. Changes in the environment can be modeled in topological terms. The identification of critical values in such models is useful for assisting decision-making processes. Similar approaches have addressed the problem for the traffic state (fluid, saturated, congested), but a dynamic representation allows us to integrate the response of the environment into the spatial information for mining statistical indicators.

References

1. Arnaud, R., Barnes, M.C.: COLLADA: sailing the gulf of 3D digital content creation. AK Peters/CRC Press (2006)
2. Bosché, F.: Automated recognition of 3d cad model objects in laser scans and calculation of as-built dimensions for dimensional compliance control in construction. Advanced engineering informatics **24**(1), 107–118 (2010)
3. Chazal, F., Guibas, L.J., Oudot, S.Y., Skraba, P.: Scalar field analysis over point cloud data. Discrete & Computational Geometry **46**(4), 743 (2011)
4. Chen, J., Bulbul, T., Taylor, J.E., Olgun, G.: A case study of embedding real-time infrastructure sensor data to bim. In: Construction Research Congress 2014: Construction in a Global Network, pp. 269–278 (2014)

5. Curless, B., Levoy, M.: A volumetric method for building complex models from range images. In: Proceedings of the 23rd annual conference on Computer graphics and interactive techniques, pp. 303–312. ACM (1996)
6. Delgado, F., Martínez, R., Puche, J., Finat, J.: Towards a client-oriented integration of construction processes and building gis systems. Computers in Industry **73**, 51–68 (2015). DOI http://dx.doi.org/10.1016/j.compind.2015.07.012. URL http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166361515300300
7. Delgado, F., Martinez-Gonzalez, M.M., Finat, J.: An evaluation of ontology matching techniques on geospatial ontologies. International Journal of Geographical Information Science **27**(12), 2279–2301 (2013). DOI 10.1080/13658816.2013.812215
8. Eastman, C.M., Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R.: BIM handbook: A guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers and contractors. John Wiley & Sons (2011)
9. Euzenat, J., Shvaiko, P., et al.: Ontology matching, vol. 18. Springer (2007)
10. Forster, C., Pizzoli, M., Scaramuzza, D.: Svo: Fast semi-direct monocular visual odometry. In: Robotics and Automation (ICRA), 2014 IEEE International Conference on, pp. 15–22. IEEE (2014)
11. Hansen, C.D., Johnson, C.R.: Visualization handbook. Elsevier (2011)
12. Mur-Artal, R., Montiel, J.M.M., Tardos, J.D.: Orb-slam: a versatile and accurate monocular slam system. IEEE Transactions on Robotics **31**(5), 1147–1163 (2015)
13. Nkisi-Orji, I., Wiratunga, N., Massie, S., Hui, K.Y., Heaven, R.: Ontology alignment based on word embedding and random forest classification. In: Proceedings of the European Conference on Machine Learning and Principles and Practice of Knowledge Discovery in Databases (ECML-PKDD 2018). Springer (2018)
14. Pultar, E., Cova, T.J., Yuan, M., Goodchild, M.F.: Edgis: a dynamic gis based on space time points. International Journal of Geographical Information Science **24**(3), 329–346 (2010)
15. Rusu, R.B., Blodow, N., Beetz, M.: Fast point feature histograms (fpfh) for 3d registration. In: Proceedings of the 2009 IEEE international conference on Robotics and Automation, pp. 1848–1853. IEEE Press (2009)
16. Scaramuzza, D., Fraundorfer, F.: Visual odometry [tutorial]. IEEE robotics & automation magazine **18**(4), 80–92 (2011)
17. Sorge, H., Stöcker, H., Greiner, W.: Poincaré invariant hamiltonian dynamics: modelling multi-hadronic interactions in a phase space approach. Annals of Physics **192**(2), 266–306 (1989)
18. Srinivasan, R., Kibert, C., Thakur, S., Ahmed, I., Fishwick, P., Ezzell, Z., Lakshmanan, J.: Preliminary research in dynamic-bim (d-bim) workbench development. In: Proceedings of the Winter Simulation Conference, p. 53. Winter Simulation Conference (2012)
19. Thanou, D., Chou, P.A., Frossard, P.: Graph-based compression of dynamic 3d point cloud sequences. IEEE Transactions on Image Processing **25**(4), 1765–1778 (2016)
20. Yang, S.W., Wang, C.C.: Multiple-model ransac for ego-motion estimation in highly dynamic environments. In: IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2009. ICRA'09, pp. 3531–3538. IEEE (2009)
21. Zanella, A., Bui, N., Castellani, A., Vangelista, L., Zorzi, M.: Internet of things for smart cities. IEEE Internet of Things journal **1**(1), 22–32 (2014)

Towards the Design and Implementation of a Smart City in Bogotá-Colombia

Marcelo Herrera Martinez[1[0000-0003-2360-4184]], Oscar Acosta Agudelo[1[0000-0002-5002-4997]], Cesar O. Diaz[2[0000-0002-9132-2747]], Manuel Dávila Sguerra[3[0000--0003-1513-9374]], Aura Munar Rodríguez[3 [0000-0001-8790-7788]], Javier Ríos Suárez[3 [0000-0001-8048-0590]] and Nancy Edith Ochoa Guevara [3 [0000-0002-4533-4990]]

[1] Universidad de San Buenaventura, Bogotá Carrera 8H #172-20, Colombia
[2] Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, Bogotá Carrera 4 #22-61, Colombia
[3] Corporación Universitaria Minuto de Dios, Bogotá Calle 81B # 72B-70, Colombia

{mherrera, oacosta}@usbbog.edu.co
cesaro.diazb@utadeo.edu.co
{mdavila, aura.munar, javier.rios, nancy.ochoa}@uniminuto.edu

Abstract. This paper presents experiences in a project proposal that is about the development of a digital platform, which articulates the local environments of some universities in Bogotá city. The project will be carried out in conjunction with the community, contributing to the construction of tools, which enable the implementation of technologies dedicated to the evaluation of indicators and the improvement of the urban environment. This is part of the technologic branch of a Bogota´s Universities Network called RUMBO denominated "Focus Group of Smart-Cities", which focuses on the incursion of information technology into the reorganization and development of cities and municipalities in Colombia.

Keywords: Georeferentiation, augmented reality, virtual reality, social development, Smart-Cities, innovation, mobility, tourism, energy, government.

1 Introduction

In recent decades, it is common to heard about revolutionary ways in conjunction with state-of-the-art technologies for the development of smart cities. Currently, these ideas have come to Colombia with the purpose of improving the quality of life of citizens and the prosperity of cities. Smart city is defined as effective integration of physical, digital and human systems in the built environment to deliver a sustainable, prosperous and inclusive future for its citizens (The British Standards Institution, 2014). The proposed definition describes the basic meaning of Smart city, in which a better future is built for the next generation.

Boosted by Governmental plans (Departamento Nacional de Planeación, 2014), under the concept of "Friendly and Sustainable Cities for the Equity", an integral conception of the urban development has begun in Colombia. This concept conveys to

the planning and coherent actuation which articulates populated places, potable water and basic sanitation, urban mobility, under the frame of integral urban actuations and the reinforcing of planning instruments and regional and local ordering.

Additionally, it is important to mention that articulation between education in Colombia and the productive sector is embodied in the Colciencias (Administrative Department of Science, Technology and Innovation in Colombia) approach, where it is considered that research from innovation and competitiveness should be oriented towards five fundamental areas: I) identification and sustainable use of biodiversity, II) use and preservation of water resources, III) development of electronics and materials, IV) development of research in health sciences and V) Colombian social studies concerning peace and social cohesion. These five areas are treated in different programs from which the formation of human resources and the generation of intellectual production are sought as a contribution to the sustainable development of Colombia.

Moreover, in accordance to Crespi, Maffiolo & Melendez (Crespi, Maffioli, & Melendez, 2011), (Consejo Nacional de Política Económica y Social, 2016) between 1995 and 2007, the participating firms in the Colciencias co-financing calls obtained productivity increases of 15.3% on average. Additionally, growth was recorded in employment (12.6%), in the number of products (9.3%) and in market share (3.5%). Therefore, a greater articulation with the institutions that generate knowledge has clear advantages for companies in terms of their productivity.

Some works related to smart and sustainable cities have been part, in a conjunctural way, in some projects developed in Colombia. However, the creation of Focus Group on Smart Cities of Bogota´s Universities Network called RUMBO (in Spanish stands for Red Universitaria Metropolitana de Bogotá) was recently. This Group create a “space” where universities can join to work in future projects about smart and sustainable cities. The first project to work among universities is called Digital Neighborhood.

The first Digital Neighborhood known in Colombia was developed at the Minuto de Dios University (Uniminuto) in the second semester of 2010. The project was uploaded in 3D to Google earth, and a group of 18 teachers and 1200 students worked using web 2.0. Methodology was designed and implemented with students to model a neighborhood of approximately 2.7 km.

In the Digital Neighborhood project by Focus Group on Smart Cities, a methodological design is generated for the implementation of Smart city using the Uniminuto experiences, initially in a 300 meters radius from each university in Bogotá city, and it is about validating it with some or some suitable tools. Within the theoretical objectives of the work is also the exploration of the current situation of the city.

The empirical objective of this work is to develop the methodological design of Smart City for the city of Bogotá and simultaneously try to identify the concrete practical solution, with which these ideas can be put into practice. Part of the empirical part of the project is also to create a concrete project, which originates from the designed solutions and the realization of this project in practice with the help of empirical methods chosen for validation.

The structure of the paper is as follows, first section is the introduction, then in section II is the smart city context. Methodology of the project is presented in section

III. Section IV mention the scope of the project. Finally, in section V conclusions and future work are presented.

2 Smarts Cities

The progressive urbanization process, that is to say the concentration of inhabitants in the peripheries of the city and its surroundings, and its consequences (positive and negative), currently reach a level of specialized and secular consciousness. The conceptual idea of smart cities combines effectiveness, sustainability and progress in modern times and brings in many aspects adequate solutions for the coming crisis, from the point of view of overpopulation and the excessive consumption of resources.

In the remainder of the text, "Smart" is used, which means the effective use of resources with the use of modern communication and information technologies, which try to maintain performance, while trying to reduce emissions and the negative effects on the environment. In this sense, we understand emissions, such as substances such as polluting gases, but also residues of plastics and other materials produced by man, where their low concentration is preferable.

2.1 Significance of the definition of "Smart City"

Colldahl et al (2013) emphasize that this definition depends on the context, where it is used, which limits its generalization.

As noted by Copenhagen Cleantech Cluster (Copenhagen Cleantech Cluster, 2012), it can be defined that a city is not intelligent, if:

1) It is overpopulated from the point of view of surplus of cars, food, water, energy and so on.
2) Individual components and city networks are not able to communicate and function as a whole.
3) Individual components and city networks are static.
4) Stakeholders are not connected at any point to the decision and planning processes of the city (Colldahl, Frey, & Kelemen, 2013).

Thanks to the flexibility of the definition of Smart City, we frequently find ourselves (as indicated by (Hollands, 2008)), with the erroneous understanding of the concept, misleading it into a marketing tool, in order to achieve visibility or to advertise certain technologies.

The non-unification and ambiguity of the concept is due to its interdisciplinary origin, which in the past has been defined several times by different institutions, despite being these descriptive definitions instead of normative (Andersen & Bhandari, 2015). In addition to this, these definitions are, in most cases, affected by the objectives of their use and are delimited by the area of use (environmental, for example). Dameri and Rosenthal-Sabroux (Dameri & Rosenthal-Sabroux, 2014) warn that some of the approaches define smart cities as part of the digital revolution, which leads to a dynamic integration of modern technology into practically all fields of life, including

state administrations or of cities (Dameri & Rosenthal-Sabroux, 2014). In agreement with the multidisciplinary concept, Hollands (Hollands, 2008) presents a thesis of the concept of self-satisfaction, where he criticizes the fact that some governments use the concept of Smart Cities in a popular way, only emphasizing the ICT part, without considering other factors.

Nam and Pardo (Nam & Pardo, 2011) define the concept of Smart City in a broader context, such as the mixture of three basic stones: technology, population and institutions:

1) The technological dimension is divided into: digital city, intelligent city, omnipresent city, city network, hybrid city and information city.
2) The human dimension is divided into a creative city, a city in the process of education, a human city and a cognizant city.
3) The institutional dimension is divided into an intelligent community and an intelligent developing community (Nam & Pardo, 2011).

Toppeta (Toppeta, 2010) defines the smart city as a city, where technology is properly combined with the organizational-institutional capacity to improve the quality and sustainability of citizens' lives (Toppeta, 2010).

Furthermore, Giffinger et al. (Giffinger, 2007) presents the concept of smart city as a city where its economic functioning, population, administration, mobility, environmental and living standards work well in the near horizon and is built with funds of foundation and endowment and conscious and independent citizens.

3 Methodology

The starting point of this project is the determination of the state-of-the-art. The implementation method is created based on the explanation with examples of the practical life of Smart City, and based on its comparison, the Smart City model of Bogotá is developed, framed within the specific functionalities where the model would work.

To begin, the digital neighborhood research project experience developed at Minuto de Dios University will be used as reference. During this process were displaced 1200 students from five faculties of Uniminuto Headquarters, which were made up of different programs such as bachelor's degrees, technology, engineering, administration, psychology, social work, philosophy, among others, was a total of 27 programs that participated in the identification of the properties of the Minuto de Dios neighborhood.

The base exercise was an official map of the neighborhood issued by the Agustín Codazzi Institute, where a layout was made, and a software was used to model each of the existing buildings and houses in the neighborhood. This pedagogical work allowed students to recognize its university context and the learning of technological tools for social purposes.

Then, on the Google Earth platform 1300 properties composed by houses and buildings in 3D where displayed, as well as, 8 information layers that allow address-

ing issues identified as priority by residents, merchants and visitors. An example of Uniminuto 3D building can be seen in Figure 1.



Fig. 1. Google Earth 3D view of Uniminuto in Bogotá-Colombia.

In addition, it will be taken as initial reference the cartographic information of the University environment, facilitated by the IDECA, the 3D model of the University environment will be designed on a digital platform, which consists in the survey of the buildings and attributes of the spatial objects, covering an approximate area up to 300 meters around.

Moreover, a design by roles is proposed (Coordinator, teacher and student) in which the methodology applied by Uniminuto in each of the universities will be adapted and adjusted as said before. For example, the Participatory Action Research (IAP) pedagogical praxeology, participation of the actors (students, teachers and community of the environment); and applied research. Likewise, it will seek to implement the platform under free software tools.

Several layers are planning to be implemented and one of them consists of the noise map survey of the areas surrounding the universities. Additionally, the digitalization of the relationships between people, commerce and environment of the action areas of each university belonging to the project is proposed, in order to generate valuable information for the decision making of urban development and to be able to leverage it with the use of the technology.

Finally, the conversion to smart city is achieved through the improvement of elements such as transport, home or energy efficiency, among others, trying to achieve better management of resources and a lower impact on the environment.

4 Scope

The main objective of the project is to develop a system that will impact several smart cities aspects around the universities in Bogotá-Colombia that participate. Initially, it is considered to cover a 300 meters radius from each university where students, teachers and researchers will capture, record and process geographical and non-geographical information. Then, this information it will be taken to a data base where a SIG software can read it and visualize it. Following, main smart cities aspects to be considered are presented.

4.1 Commerce

Implementing Augmented Reality as an advertising strategy of products and services of the commercial premises located in the neighborhood of some universities. In articulation with the private company, a store management system will be delivered to some beneficiaries of the neighborhood to manage their business with cutting edge technology, accompanied by a tablet, a barcode reader and a ticket printer.

4.2 Smart health

Within the Health dimension it is proposed to have a primary health care service for seniors, a large population in the neighborhood which requires a close and efficient service.

Additionally, smart Healthcare involves the latest digital and mobile devices. They are intelligent in the sense that they not only cure a disease but face it at the right time (diagnosis and prevention). This is known as Internet of Things (IOT) in health care that work through sensors and collect patient data remotely. These data can be stored and analyzed by doctors, researchers and health professionals for better diagnosis and solutions. These digital records save costs and time to patients and hospitals, since they do not only offer personalized treatments and medicines, but also provide preventive measures by collecting data in real time. Considering that this is a future of healthcare, many companies are investing in IOT medical devices and laptops that collect data and compile it in a structured way. This is also carried out using Artificial Intelligence (AI) for the evaluation and possible outcome of these data for quick solutions. Many times, when specialized doctors are located elsewhere, the help of robots is also used to communicate, diagnose and treat patients.

4.3 Smart Healthcare for Smart Cities

The use of digital and mobile technology is creating smart health solutions for people residing in urban centers. The Internet of Things (IOT) revolution that has spread in the energy, transportation, security and infrastructure segments will have radical results in health care. A unified health system, the collection and exchange of data, analysis and research practices will convey in a new era to address current health

problems. A society is built by its people. A healthy society creates the right balance in every sphere of life. Over the years, advancement in the medical sciences created an effective diagnosis and solutions for many nefarious diseases. But the increase of the population and the urban life style demand a network of intelligent medical attention that can take care of its employees in a faster and more efficient way.

To provide better health services, medical and pharmaceutical companies, health professionals, researchers and municipal administrators are working on solutions and IOT devices that can minimize response time, offer rapid emergency services, reduce overcrowding in hospitals, provide remote treatment and collaborate with doctors from around the world. Because this project is a smart city prototype around some universities, initially a reduced emergency data will be processed. In future work, this prototype will be improved to support massive emergency calls from citizens.

4.4 Education

Technology becomes a communication tool for people with a hearing disability, in that sense, older adults know and use technology as an interesting challenge since it helped them to break down barriers of communication with children and grandchildren, to have an email account, to be able to consult the topics that interest them, to talk with a relative that they do not have close using technology. Other of our groups focused on are children and young people.

The main idea is to provide access to technology by means of different strategies and to massify technology as a democratic tool to access information as the axis of the global economy. Likewise, there are developments in virtual learning environments that transcend parallel life through 3D environments inspired by the cities in *Second Life*, so that free software tools can develop 3D learning environments.

4.5 Environment

Cities are responsible for up to 70% of global greenhouse gas emissions and consume 75% of global energy (Satterthwaite 2008). These large communities offer both challenges and opportunities for environmentally conscious developers. To make them more sustainable, the design and practice of the building, as well as perception and lifestyle, must adopt a sustainability approach. These figures are often repeated. But taking measures at this scale requires technological and socio-institutional innovations. Efforts to reduce urban emissions face the complexity of coordinating broad coalitions of action among governmental, private and civil society actors, and the need to collect, share and analyze new and existing data from all these traditionally isolated sectors. The effective implementation of smart cities requires an integrated and interdisciplinary approach to sustainable development. To ensure a low carbon, low water and low ecological footprint with an infrastructure designed to adapt to the current and future impacts of climate change, developers should consider the following at the project design and planning stage:

- Planning of land use.

- Green buildings and Energy Conservation.
- Decrease in Disaster Risk.
- Efficiency in the reuse and recycling of water.
- Waste management.
- Sustainable transport.
- Ecology and Biodiversity.
- Community.

A sustainable city or eco-city is a city designed considering the environmental impact, inhabited by people dedicated to minimizing the necessary inputs of energy, water and food, and the production of heat waste, air pollution: CO2, methane and pollution of the water. Richard Register coined the term "ecocity" for the first time in his 1987 book, Ecocity Berkeley: building cities for a healthy future. Other prominent figures who conceived the sustainable city are the architect Paul F Downton, who later founded the company Ecopolis Pty Ltd, and the author Timothy Beatley, who has written extensively on the subject. The field of industrial ecology is sometimes used to plan these cities. A sustainable city can feed itself with minimal dependence on the surrounding countryside and can be enhanced with renewable energy sources. The crux of this is to create the smallest possible ecological footprint, and produce as little pollution as possible, to use the land efficiently; the compost used materials, recycled or converted waste into energy, and therefore, the city's overall contribution to climate change will be minimal, if these practices are met.

These ecological cities are achieved through various means, such as:

- Different agricultural systems, such as agricultural plots within the city (suburbs or center). This reduces the distance that food has to travel from one field to another. The practical work of this can be done through small-scale / private agricultural parcels or through large-scale agriculture (for example, farming farms).
- Renewable energy sources, such as wind turbines, solar panels or biogas created from wastewater. Cities provide economies of scale that make such energy sources viable.
- Various methods to reduce the need for air conditioning (a massive demand for energy), such as planting trees and clarifying surface colors, natural ventilation systems, an increase in water characteristics and green spaces equivalent to at least 20% of the surface of the city. These measures counteract the "heat island effect" caused by the abundance of asphalt, which can cause urban areas to be several degrees warmer than the surrounding rural areas, up to six degrees Celsius at night.
- Improvement of public transport and an increase in pedestrianization to reduce automobile emissions. This requires a radically different approach to urban planning, with integrated business, industrial and residential areas. The roads can be designed to make driving difficult.
- Optimal construction density to make public transport viable but avoid the creation of urban heat islands.

- Solutions to reduce urban expansion, seeking new ways to allow people to live closer to the workplace. Since the workplace tends to be in the city, city center, or urban center, they look for a way to increase density by changing the outdated attitudes that many suburbanites have towards the downtown areas. One of the new ways to achieve this is through solutions developed by the Smart Growth Movement.
- Green roofs.
- Transportation of zero emissions.
- Zero energy construction.
- Sustainable urban drainage systems.
- Energy conservation systems / devices.
- Xeriscaping - design of garden and landscape for water conservation.

In Colombia, the most transcendental result of the effort has been the creation of a new paradigm, the Sustainable Development, through which some necessities of the socioeconomic development are to become compatible to the conservation of the environment, in order to guarantee higher quality of life to the future generations (Presidencia de la República, 1996).

Joint work with owners of commercial premises to recycle more and pollute less, a strategy that allowed the use of solid waste avoiding sending them to the Doña Juana Landfill, reaching a recycling figure of 109 tons where there is work with an association of recyclers ANRT; the work in the search for alternative energies contribute to the mitigation of the effects of climate change; Ecosystem Smart has a meteorological network which generates data that over the years will have enough data to make weather forecast.

4.6 Transportation and mobility

Urban transport is responsible for a third of the emissions of greenhouse gases that exist. Therefore, says the European Commission, it is a need to change the European transport system, as well as the behavior of society and companies regarding mobility and start promoting an integrated and more efficient mobility system and towards the use of alternatives fuels to reduce pollution and greenhouse gases. The use of natural gas as a fuel is an alternative that is spreading in many countries in Latin America and Europe, such as Italy. In Spain, this fuel, which not only serves cars but can also be used in heavy vehicles, is becoming increasingly popular to the point that last year became the most widely used alternative fuel, where vehicle sales natural gas increased by more than 20%, according to data from the Iberian Association of Natural Gas for Mobility (GASNAM). This increase is justified by ecological reasons, since its emissions are considerably reduced with respect to gasoline and diesel, and also in economic terms, since it represents a saving of up to 50% and 30% in the cost per kilometer compared to these fuels. Other heavier means, such as trucks, ships or trains, or even public transport in large cities, such as buses, are also betting more and more on the use of this energy source. Its use improves the impact of transport on the environment and serves as an example of the change that is taking place in the world.

This project involves two important environmental and economic aspects, needing both high technology and good behavior of the people. It supports the optimization of traffic flows as well as the interactions with the different groups of citizens in their habitability and availability in their mobility, as well as the quality of local transport services. Likewise, smart coordination of electric vehicles (García, 2018) will be considered to promote this green transportation system.

4.7 Residue administration

The management of waste is another element on which we must work to improve. The report "Smart Cities: 2030: Vision document" of the GICI, points out that the polluting waste produced by cities needs to be processed, recycled and energetically valued. One way to reuse this waste is biomethane, from biogas, a renewable gas coming, among other origins, from the decomposition of organic waste and that can be used as a fuel for transport or be injected directly into the gas distribution network natural so that it can be consumed by a home, industry. The use of biomethane is already being investigated in several projects throughout the country.

4.8 Domotics

At the energy level, we are also experiencing a process of transition from a centralized energy system to a new model with multiple distributed energy resources, which are integrated into an increasingly decentralized system. To respond to the new energy needs of today's society, companies are evolving their electricity networks in Spain with the aim of turning them into smart grids or smart grids and that consumers have an active role in decision-making. With smart meters, users will have an a la carte energy consumption. At the same time, the energy distributors are replacing their pool of analog meters with smart meters. These devices differ from the traditional because they are more automated and give us information that allows users to consume a la carte. Using this type of meters, customers can have the power of decision, choice and management of energy. They will know the data in real time, which can help facilitate savings (by choosing the tariff that suits you) and, with this, help the responsible use of energy. The replacement of our meters began a few years ago and, according to current legislation, we all have to have these new devices before we start 2019. For now, according to calculations of the National Commission of Markets and Competition (CNMC), at the close of the first semester of 2016, there were more than 28 million meters installed in Spain, 62% of the entire park, although this percentage is much higher in some distributors, which have already exceeded 90%.

4.9 Energetic efficiency

In this energy transformation appear concepts such as those of buildings or districts of almost zero consumption (nZeb, for its acronym in English) or blocks of positive energy (PEB), which aim at energy self-sufficiency and even the net production of energy in the buildings or districts, based on a reduction of consumption, an inte-

gration of renewable generation and a coordination between production and consumption. According to the European Directive of Performance of Buildings (Energy Performance of Buildings Directive), all the new buildings will have to have an almost no energetic consumption as of 2020. This measure goes in line of the objectives of the European Union in matter of fight against climate change until 2030, which also include an improvement of at least 30% in energy efficiency as a whole. Another pioneering initiative has been developed at the La Paz University Hospital in Madrid. The project includes an important remodeling of the air conditioning system, with the construction of a thermal power plant located in the hospital. This change has led to a 33% reduction in energy costs and a 50% reduction in hospital CO2 emissions.

4.10 Communications

National policy in Colombia, such as the Digital Live Plan, flagship program of the Ministry of ICT, presents a preliminary analysis carried out by this ministry, in which the successful internet plans in the world are made up of the following 5 dimensions:

1) Visión País (country perspective), which promotes the deployment of broadband (fiber) incorporating the structure of the industry and the positions of the interested parties.
2) Regulation, that is, the set of rules established by the regulator. For example, the obligation to separate the central network and the last mile or the setting of price limits to access the network.
3) Initiatives to increase demand, which include legislative measures and plans to increase demand for ICT: For example, the offer of internet and computers in schools, e-government, e-health and e-learning.
4) Infrastructure construction process (for example, fiber), which comprises the set of actions necessary to complete the network deployment, in which it is necessary to involve the stakeholders (business partners, shareholders and suppliers).

Intelligent city communications are defined in several scenarios, communications between individuals, individual-government communications, individual-machine communications, and machine-machine communications. Communications between individuals, are framed in the channels created for the exchange of ideas between people. Individual communications - government, are the channels created for the individual to access the services that the government has at their disposal. Individual communications - machine, are the channels created for the individual to access the digital services present in their environment and the necessary metadata for a correct exchange. Machine-machine communications refers to the technologies and ontologies necessary for the efficient exchange of data and information between devices.

4.11 Smart portable devices

Smart portable devices are products in motion. An individual or patient can use them to assess their health status or exercise regimen without professional help. To name a few, these devices can help control blood glucose level, body temperature, heartbeat, cardiovascular problems, vision quality and chronic ailments. These devices have been a boom for diabetic, asthmatic and cardiac patients. Products such as exercise tracker or fitness bands have gained great popularity among fitness enthusiasts. Companies like Fitbit, Under Armor are showing new technologies in these products.

4.12 Ultimate Smart portable devices

Intelligent pulse oximeter: the device helps to control the heart rate, arterial oxygen saturation (SO2), respiratory rate and perfusion index of the person. The device checks the amount of oxygen and hemoglobin present in the blood. They are practical products, and anyone can operate them by placing them on the tip of the finger or on the lobe of the ear. They are beneficial in critical emergency care, patients with respiratory or cardiac problems and sleep disorders. Professionals such as pilots, mountaineers, athletes who need to control the level of oxygen at high altitude or monitor physical activity can use this product effectively.

Smart watches: these watches, in addition to making calls and text messages, can help people to follow their physical activities. They come with long-lasting batteries. They present on-screen training, report on calories burned, active minutes, control sleep patterns, monitor heartbeat, track running distance, etc. Almost all major smartphone companies are developing these watches to take advantage of its growing market.

3D printed pills: the US Food and Drug Administration. UU It approved these pills for the first time in 2015. The first medication was called Spritam and is used for seizures in children and adults with epilepsy. They are porous pills that dissolve with a sip of water just like any other pill. The ZipDose technology used to develop them allows a more compact packaging and precise dosage. With 3D pills, medications can be produced close to patients and can be customized according to their treatment.

Smart contact lenses: these lenses are developed by Google and help people with vision and diabetes problems. They measure the glucose level of the tears in the person's eye. They help restore the eye's natural autofocus.

Smart Bras: They are useful to identify the state of mammary health in women. They are integrated with sensors that control breast tissues and alert against any cancer symptom. They are connected to an application that registers information and guides users about proper breast health care. They are also useful in the follow-up of physical activities, the respiratory count and the heart rate.

4.13 Security

There are two important areas that are addressed in security in smart cities. 1. Security in the individual and machines. 2. information security. The first deals with the integrity of both the individual and the machine or device that provides a service to the individual, this includes the systems that make up the security services (Police, Prosecutor's Office, CTI, etc.) and private security. In the second, it deals with cybersecurity and what is known as forensic computing or in this case where we will have even connected devices, it is called digital forensics.

In terms of security dimension, the work with the National Police for the development of a technological platform reduces and counteracts the level of insecurity in the neighborhood.

4.14 Emergency and alert systems

Emergency systems or alerts refer to the use of communication channels to reach effectively to deliver messages to citizens in real time. They also refer to the use of systems based on hardware and software to monitor relevant physical variables in the prediction of emergencies or catastrophes for which it is relevant to have a prior reaction to it.

5. Conclusions and Future work

1. The generation of an initial project after 12 months of work articulated among different areas of knowledge, with the support of a network of universities created to join efforts, such as RUMBO. This evidenced inter-institutional needs and competencies that potentiated interdisciplinary join work.
2. Higher education establish not only a constant training process but also a strategic social function that must be by following the needs of the community by its benefit search and integrating with Information and Communication Technologies (ICT)). Become a relevant component in the development and transformation of the environment, allowing society to empower itself in the interactive activities that lead it to understand its context, through access to augmented reality.
3. The results of this project allowed the approach to the business sector, expanding the scope of the same facing the vision of territory and thus we can reach municipalities in Colombia.
4. Initially it is a research work, however, results could be commercialized through private companies interested in this area.

As work in the immediate future is planned to implement more layers of services that can interact in the digital neighborhood with real life

References

1. Andersen, M., & Bhandari, S. (2015). Assessment and Normative Guidance of the Collective Mindset Maturity Regarding Open data in Smart Cities. Copenhagen: Aalborg University Copenhagen.
2. Colldahl, C., Frey, S., & Kelemen, J. (2013). Smart Citiess: Strategic Sustainable Development for an Urban World. Karlskrona (Suecia): School of Engineering Blekinge Institute of Technology. Obtenido de http://www.divaportal.org/smash/get/diva2:832150/FULLTEXT01.pdf
3. Consejo Nacional de Política Económica y Social. (2016). Documento CONPES. Bogotá, D. C. : Departamento Nacional de Planeación.
4. Copenhagen Cleantech Cluster. (2012). Danish Smart Cities: Sustainable Living in an Urban World. (J. Mortensen, F. J. Rohde, K. R. Kristiansen, M. Kanstrup-Clausen, & M. Lubanski, Edits.)
5. Crespi, G., Maffioli, A., & Melendez, M. (2011). public Support to Public Support to Colombian COLCIENCIAS´ Experience. Washington (EEUU).
6. Dameri, R., & Rosenthal-Sabroux, C. (2014). Smart Cities: Strategic Sustainable Development for an Urban World. Berlin: Springer.
7. Departamento Nacional de Planeación. (2014). Bases del Plan Nacional de Desarrollo 2014-2018. Bogotá.
8. García-Magariño, I., Palacios-Navarro, G., Lacuesta, R., & Lloret, J. (2018). ABSCEV: An agent-based simulation framework about smart transportation for reducing waiting times in charging electric vehicles. Computer Networks, 138, 119-135.
9. Giffinger, R. e. (2007). Smart cities - Ranking of European medium-sized cities. Vienna: Centre of Regional Science, Vienna UT.
10. Hollands, R. (2008). Will the Real Smart City please stand up?: Intelligent, progressive or entrepreneurial? City: Analysis of Urban Trends, Culture, Theory, Policy, Action, 12(3), 303-320.
11. Nam, T., & Pardo, T. (2011). Conceptualizing Smart City with Dimensions of Technology, People and Institutions. Proc. of the 12th Annual Intern. Confer. on Digital Government Research, (pags. 282-291). New York.
12. Presidencia de la República. (1996). Colombia: al filo de la oportunidad. Informe de la misión de sabios. Misión Ciencia, Educación y Desarrollo. Tomo 1. Santafé de Bogotá, D. C. : Tercer Mundo Editores.
13. The British Standards Institution. (2014). Smart city framework - Guide customer service to establishing strategies for smart cities and communities. Obtenido de http://shop.bsigroup.com/upload/267775/PAS%20181%20(2014).pdf
14. Toppeta, D. (2010). The Smart City Vision: How Innovation and ICT can build Smart, "Livable", Sustainable Cities. The Innovation Knowledge Foundation. Obtenido de https://www.scribd.com/document/45327903/The-SmartCity-vision-How-Innovation-and-ICT-can-build-smart-liveable-sustainablecities

Crowdsourcing Optimized Wireless Sensor Network Deployment in Smart Cities: A Keynote

R. Asorey-Cacheda[1], A.J. Garcia-Sanchez[2] C. Zúñiga-Cañón[3], and J. Garcia-Haro[2]

[1] Centro Universitario de la Defensa (University of Vigo), Escuela Naval Militar, Plaza de España, s/n, 36920 Marín, Spain
rasorey@cud.uvigo.es
[2] Department of Information and Communication Technologies, Technical University of Cartagena, ETSIT, Campus Muralla del Mar 1, 30202 Cartagena, Spain
{antoniojavier.garcia,joang.haro}@upct.es
[3] Research Group COMBA R&D, Santiago de Cali University , Cali, Colombia
claudia.zuniga00@usc.edu.co

Abstract. The deployment of wireless sensor networks in smart cities for environmental monitoring is a complex issue. One of the main problems is to determine the most appropriate places for these tasks. This paper proposes the use of information from crowdsourcing to identify places of interest from the environmental point of view to deploy the sensor network.

Keywords: wireless sensor networks, crowdsourcing, optimization

1 Introduction

This paper presents the context in which the *Crowdsourcing Optimized Wireless Sensor Network Deployment* (CrOWD) project is being developed. The CrOWD project proposes the use of data sources from crowdsourcing for the design, characterization, integration and analysis of wireless sensor network (WSN) architectures for environmental monitoring in the context of smart cities. Crowdsourcing is based on the power of the crowd to solve problems or carry out smart tasks [4]. In the context of the CrOWD project, crowdsourcing allows citizens to identify those places where they perceive environmental problems as those where it may be more useful to install an environmental monitoring node.

The paradigm of the Internet of Things (IoT) and the reduction of costs of wireless sensor technology have driven the popularization of the WSN. The implementation of WSN on a large scale faces non-trivial problems such as useful network time or capacity. To address these problems, many authors have proposed different algorithms and optimization frameworks that improve routing, energy consumption, deployment of nodes or the implementation of communication protocols, among others.

A WSN can be defined as a large number of connected nodes that detect some kind of physical magnitude [1]. In these networks, the position of the nodes does not need to be predetermined for a large number of applications. This fact allows a random implementation of the nodes, but requires that the network protocols have self-organization capabilities similar to those of ad-hoc wireless networks. However, the classic protocols for ad-hoc wireless networks are not suitable for WSNs [3,5].

This document is organized as indicated below. Section 2 shows a summary of the Urb@nEcoLife and CAMoN projects. Section 3 presents the proposal to optimize the deployment of the WSN for environmental monitoring based on information from crowdsourcing sources. Finally, section 4 presents the conclusions and future lines.

2 The Urb@nEcoLife and CAMoN projects

Within the context of the CrOWD project there are ongoing projects within this line of research. In particular, the projects "Development of an environmental control platform in urban environments using crowdsourcing (Urb@nEcoLife)" and "Co-Creative Air Monitoring Network (CAMoN)".

The Urb@nEcoLife[4] and CAMoN[5] projects are quite similar to each other. In fact, the CAMoN project can be considered as a sister project of Urb@nEcoLife. The Urb@nEcoLife project is a collaborative initiative between Spanish universities (University of Vigo and University Center of Defense) and Colombian universities (Santiago de Cali University). The project is supported by Colombian institutions and its scope of action are smart cities and environmental control. It is based on an original idea that consists of combining the information generated by citizenship (crowdsourcing[6]), the information generated by a WSN and information from open sources (meteorology, traffic, etc.) to alert the public of problems in their cities and help the authorities to urban management. The scope of the project is to establish the basic points and define the main areas of development that should be carried out a complete system. The project is structured in the following modules:

– *Crowdsourcing:* Getting citizen collaboration to obtain information on the state of the environment is not easy. It is necessary that the citizen has a tool that allows him to generate reports in a simple way and motivate him to use it. In addition, it is necessary to previously categorize the problems that the citizen (air quality, water quality, garbage, etc.) so that this information can be processed and used in other areas.

[4] http://urbanecolife.org.
[5] http://camonproject.eu.
[6] Crowdsourcing consists of outsourcing tasks that, traditionally, employees or contractors perform, leaving them in charge of a large group of people or a community, through an open call.

- *Sensor network:* Citizen information has a subjective nature and may have reliability problems. One way to increase reliability is to complement citizen information with a WSN. In this way, WSNs and crowdsourcing become complementary techniques with a greater potential than the use of each of them separately.
- *Data processing:* The data obtained from crowdsourcing and the WSN is useless if it is not processed and knowledge and new services are generated based on them. In this sense, it is necessary to address the use of big data techniques to handle a large volume of data and also assess the use of machine learning and deep learning for the interpretation of information and for the generation of new knowledge. The processing of the data has two aspects that are explained below:
  1. Information for the citizen: The citizen obtains a benefit by having access to the reports of other citizens and those captured by the WSN. In addition, based on the data, new services can be offered as historical data, recommenders to improve the quality of life (healthy routes, good practices, etc.) or generation of alerts.
  2. Information for the authorities: The authorities benefit because they can know first-hand the concerns of citizens in relation to environmental problems. In addition, thanks to the processing of data services could be generated that help urban management indicating areas on which it would be advisable to limit vehicle traffic, areas on which to develop green areas or strengthen or implement new public transport lines.

The Urb@nEcoLife project laid the foundations for the development of the European CAMoN project. In particular, this project is funded through a call made from the OrganiCity[7] project. The components of this project are the Santiago de Cali University, the Technical University of Cartagena, the University of Vigo and the University Center of Defense. The objectives in this project, based on the ideas put forward in Urb@nEcoLife, were:

- Delimit, in this phase, the environmental problem to the monitoring of air quality.
- Develop a crowdsourcing mobile app (Figure 1).
- Define a WSN topology for the deployment of air quality monitoring devices. In this case, to reduce costs, WiFi technology was chosen despite not adapting well to the WSN and having a limited coverage.
- Build a device to monitor air quality and integrate it into the topology of the WSN. The philosophy was to design a device of low cost and small size that could be mounted on public transport or installed in public buildings or authorized locations.
- Deploy the experiment in the cities of Santiago de Cali (Colombia) and Cartagena.

[7] http://organicity.eu.

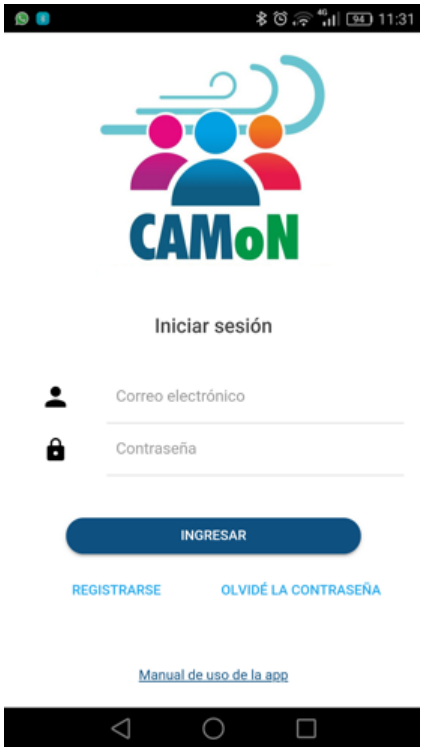


Fig. 1. Screenshot of the crowdsourcing mobile application.

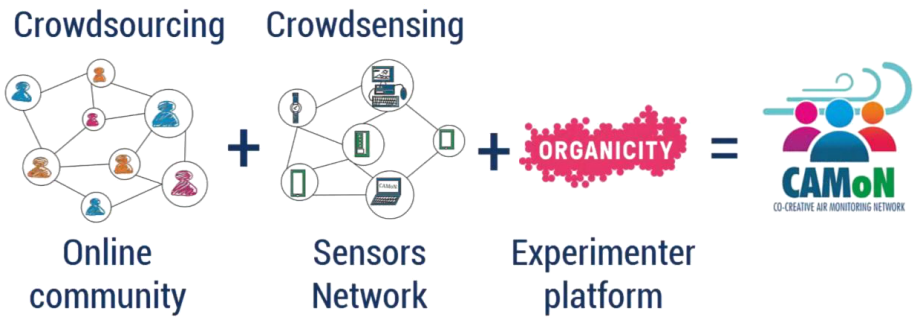


Fig. 2. Graphic summary of the CAMoN project.

In addition, the CAMoN project is integrated with the OrganiCity experimentation framework. This framework allows to store data from the experiments on this platform and facilitates the creation of services based on them. Figure 2 is a graphic summary of the CAMoN project.

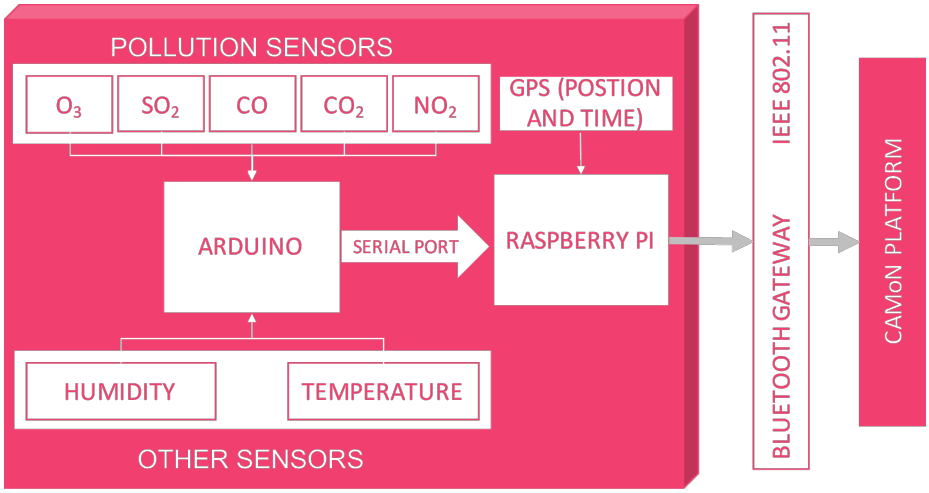


Fig. 3. Internal architecture of the air quality monitoring device.

Figure 3 represents the internal architecture of the air quality monitoring device [6]. The chosen sensors correspond to the criteria pollutants defined by the World Health Organization (WHO). The platform is based on an Arduino Nano microcontroller that digitizes the signals from the sensors and transmits them to a Raspberry Pi 3, which has a GPS and a temperature and humidity sensor. The collected data can be transmitted through the WiFi interface or the Bluetooth interface.

Regarding the architecture of the network, figure 4 represents the software architecture of the operation of the network. The data obtained is dumped on a delay-tolerant network (DTN)[8]. This decision was made because it was assumed that most of the time the devices would be disconnected. On the other hand, an mobile ad-hoc network (MANET) was chosen for the network topology in order to facilitate the routing of the data and not depend on the deployment of a specific infrastructure. The Bluetooth interface, on the other hand, allows the deployment of dynamic gateways for the transfer of data using mobile phones. This functionality is integrated into the crowdsourcing application.

Figure 5 shows an example of what would be the complete operation of the CAMoN project. It shows the integration of the system with the OrganiCity experimentation framework.

The image in Figure 6 shows one of the air quality monitoring prototypes. These devices have been tested with satisfactory results in the streets of Santiago de Cali and Cartagena.

[8] A DTN is a network architecture approach that seeks to address the technical problems in heterogeneous networks that may lack continuous network connectivity. Examples of such networks are those that operate in extreme mobile or terrestrial environments or planned networks in space.

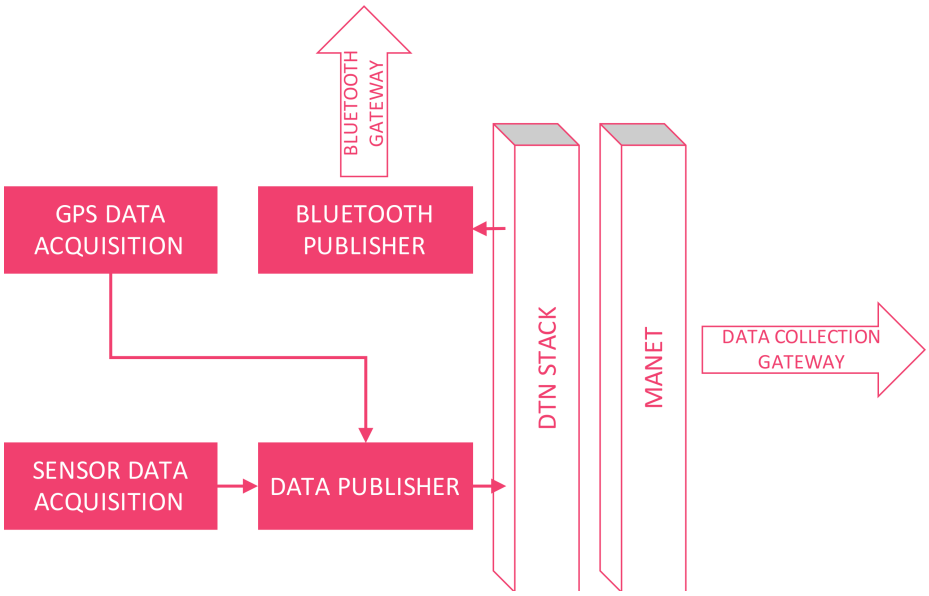


Fig. 4. Software architecture of the network in the air quality monitoring devices of the CAMoN project.

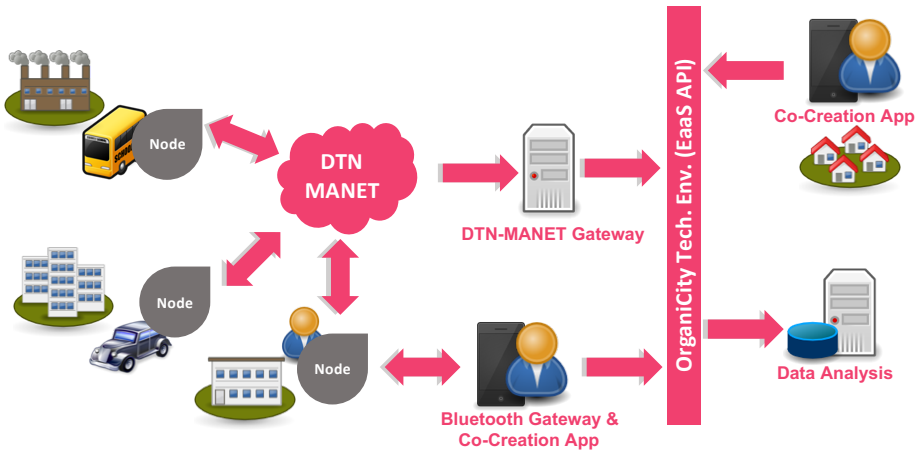


Fig. 5. Example of the operation of CAMoN.

2.1 The future of Urb@nEcoLife and CAMoN

Urb@nEcoLife and CAMoN are part of a long-term strategy of collaboration between research groups from different universities. With these projects the first steps have been taken to develop a complete system that takes advantage of the potential of the masses (crowdsourcing) to complement the WSN and with the



Fig. 6. Image of one of the air quality monitoring prototypes.

information obtained from both sources, together with other open sources, to offer services that improve the life of citizens and help the authorities in the management of smart cities.

One of the issues related to these projects that has only been treated in a basic way and that requires attention is the processing of data. Figure 7 shows the general idea of the architecture of data processing where it is necessary to develop big data and machine learning techniques to handle the foreseeable large volume of data that the platform will collect.

There are several topics that will be addressed in the immediate future:

- Improve the crowdsourcing application to make it easier to use. It is also important to look for ways that encourage its use, such as gamification[9].
- Achieve a more compact device design and develop an architecture that allows the installation of other types of sensors. In the short term, it is proposed to integrate sensors to measure water quality, which would be a very interesting complement to the monitoring of air quality. It is also proposed to replace the Arduino and Raspberry Pi platform with another more compact and optimized for the IoT.
- Use a new topology for the WSN that is not based on WiFi. The objective is to facilitate data transfer and reduce consumption. One technology that

[9] The gamification is the use of techniques, elements and dynamics of games and leisure in non-recreational activities in order to enhance motivation, as well as to reinforce behavior to solve a problem, improve productivity, obtain an object, activate learning and evaluating specific individuals.

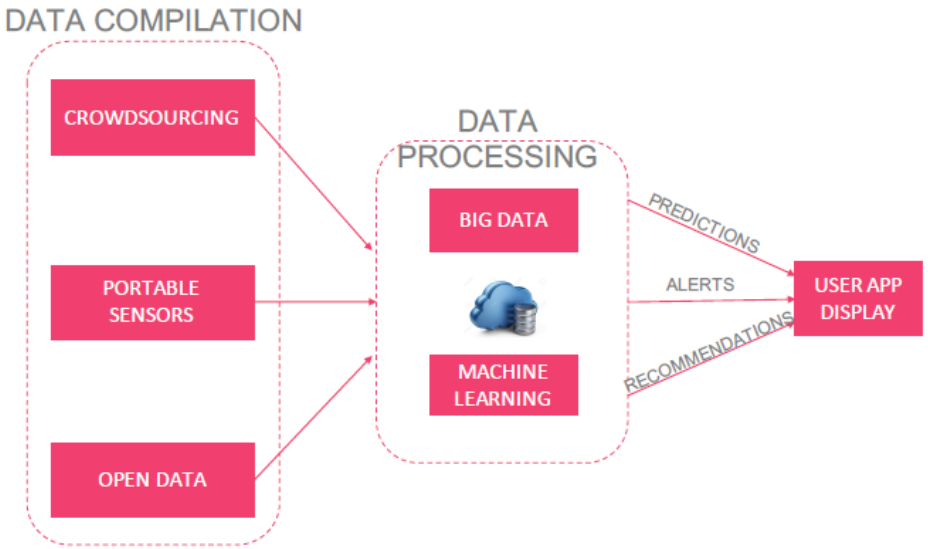


Fig. 7. General outline of the data processing for the future of Urb@nEcoLife and CAMoN.

is considered adequate is LoRa and LoraWAN [2]. In practice, LoRaWAN would allow maintaining the DTN, which is considered a necessary element in the context of this project.
– Advance in the processing of data and the development of services based on them. The management of the data will be what provides added value to the project.

3 Optimization of WSNs based on crowdsourcing

So far, crowdsourcing and WSNs, as proposed in the Urb@nEcoLife and CAMoN projects, are complementary elements that produce data that, when combined, allow the development of advanced services that, separately, would not be possible. To the best of our knowledge, there are no other works in the academic literature with a similar approach. Therefore, this proposal is sufficiently novel to warrant attention.

In the context of this research project, it is proposed to go further with this idea and take advantage of the information provided by crowdsourcing to optimize the deployment of the WSN in smart cities. There are several reasons that justify further research on this idea:

– This topic has not been addressed previously in the academic literature up to where the authors have been able to investigate.
– WSN optimization focuses mostly on energy efficiency, location, positioning and capacity. All these optimizations are done mostly from the WSN point

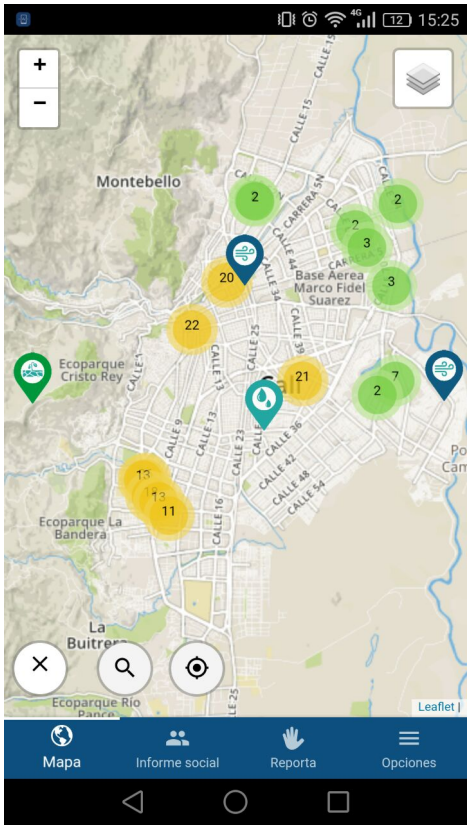


Fig. 8. Locations from where people generated reports in the CAMoN project.

of view but it does not take into account where it is useful to capture the information from the medium.

Thus, in environmental issues, it can be assumed that citizens make reports from places where they perceive problems, beyond the accuracy of this information. Therefore, following this reasoning, it seems logical that in areas where there is a greater number of reports, it is where a greater number of measures should be taken. Figure 8 shows a screenshot of the crowdsourcing application that indicates reports received by area.

By way of example, Figure 9 shows a possible optimized deployment for a WSN based on the data received through the crowdsourcing of Figure 8. The deployment of Figure 9 can be compared with another example deployment in which there has not been taken into account the crowdsourcing in Figure 10. Thus, it can be seen that many nodes are deployed in areas of little interest and that as it has to cover the entire area it has been necessary to place a larger number.

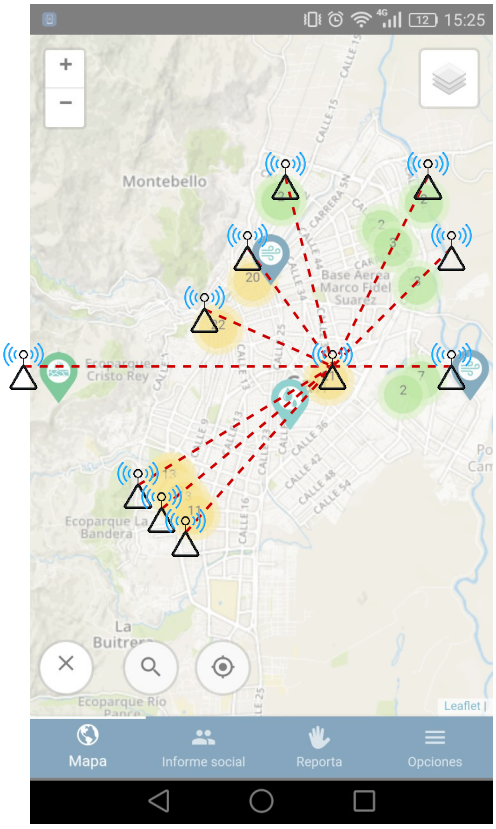


Fig. 9. Example of an optimized deployment of a WSN based on crodwsourcing sources.

The crowdsourcing data of Figure 8 correspond to real reports sent by citizens in the city of Santiago de Cali (Colombia). Likewise, the Administrative Department of Environmental Management of the Mayor's Office of Santiago de Cali offers the possibility of consulting the location of the air quality measuring stations. Figure 11 shows measurements of these stations taken on May 24, 2018[10]. It is easy to compare the positions of the meters with the locations since the reports arrive to see that there is little correlation between where the stations are deployed. This can be seen in Figure 12. Probably, based on the crowdsourcing information, we would have opted to install the stations in locations closer to the places where people send reports.

– Using the information from crowdsourcing to optimize WSNs has multiple advantages:

[10] http://www.cali.gov.co/dagma/publicaciones/38365/sistema_de_vigilancia_de_calidad_del_aire_de_cali_svcac/.

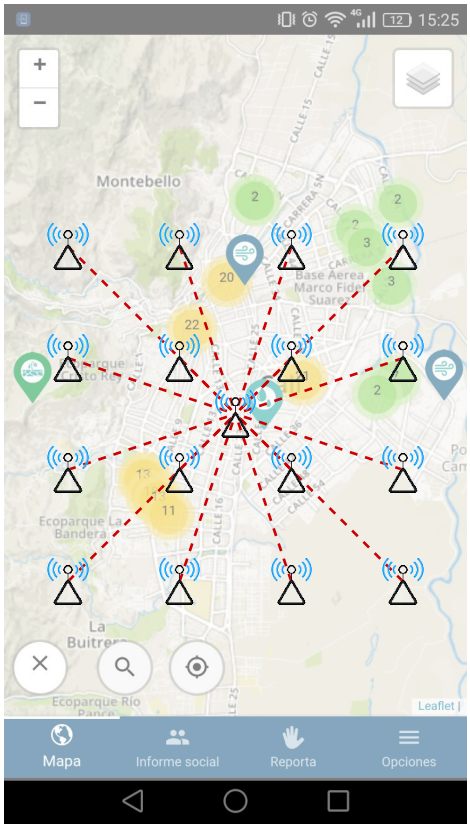
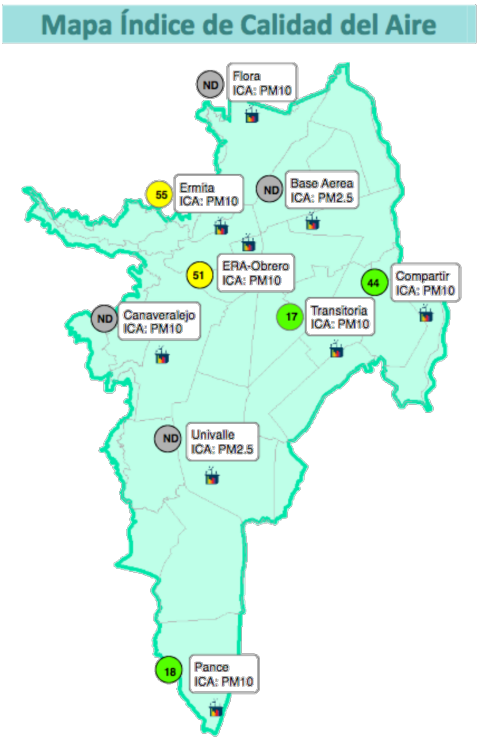


Fig. 10. Example of a WSN deployment not based on information from crowdsourcing.

- *Cost reduction:* Many times the WSN deployment and maintenance costs are not taken into account. If the operation of the WSN is optimized to take measures mainly in the places of interest, there should be a significant reduction both in the deployment of the network and in its subsequent maintenance.
- *Improved data processing:* As already indicated, the potential of the Urb@nEcoLife and CAMoN projects lies in the combination of crowdsourcing data with those of the WSN. These results can be even better if the capture of WSN data is done based on the reports received from the crowdsourcing system.
- *Improvement of data-based services:* As a consequence of the improvement in data processing, more efficient and useful services can be created both for citizens and for public authorities.



Comportamiento horario ICA

Hora	Base Aérea	Cañaveralejo	Compartir	ERA	Ermita	Flora	Pance	Transitoria	Univalle
00:00	ND	ND	34	51	55	ND	18	16	ND
01:00	ND	ND	35	51	55	ND	19	16	ND
02:00	ND	ND	35	51	55	ND	19	17	ND
03:00	ND	ND	35	51	54	ND	18	17	ND
04:00	ND	ND	36	52	54	ND	19	18	ND
05:00	ND	ND	37	52	54	ND	19	18	ND
06:00	ND	ND	39	51	53	ND	19	19	ND
07:00	ND	ND	39	49	53	ND	19	20	ND
08:00	ND	ND	40	47	52	ND	17	21	ND
09:00	ND	ND	41	47	52	ND	17	21	ND
10:00	ND	ND	42	49	54	ND	17	20	ND
11:00	ND	ND	43	51	55	ND	17	19	ND
12:00	ND	ND	44	51	55	ND	17	19	ND
13:00	ND	ND	45	52	55	ND	17	18	ND
14:00	ND	ND	44	53	56	ND	18	17	ND
15:00	ND	ND	44	53	56	ND	18	17	ND
16:00	ND	ND	45	53	56	ND	17	16	ND
17:00	ND	ND	47	53	56	ND	18	16	ND
18:00	ND	ND	48	53	56	ND	19	16	ND
19:00	ND	ND	48	53	56	ND	21	16	ND
20:00	ND	ND	47	52	55	ND	21	15	ND
21:00	ND	ND	48	51	54	ND	23	14	ND
22:00	ND	ND	48	51	54	ND	24	13	ND
23:00	ND	ND	46	51	53	ND	24	12	ND

Fig. 11. Information produced by the air quality measuring stations in Santiago de Cali corresponding to May 24, 2018.

In addition to the technical advantages and the academic interest of the idea, this proposal has a clear focus on generating knowledge and transferring results obtained in the form of:

- Generation of publications in indexed journals. The research topic is novel and, therefore, the results are relevant for the academic community.
- Generation of patents from publications (or vice versa). This research project is focused on the generation of new knowledge that is patentable.
- Transfer of results to companies through the exploitation of patents or through the creation of spin-offs. The ultimate goal of the project is to generate wealth in society through knowledge and research.

4 Conclusions and future lines

The CrOWD project is not an isolated proposal. CrOWD is part of and is a natural continuation of the Urb@nEcoLife and CAMoN projects, which are currently being executed. For all this, the CrOWD project is one more step towards

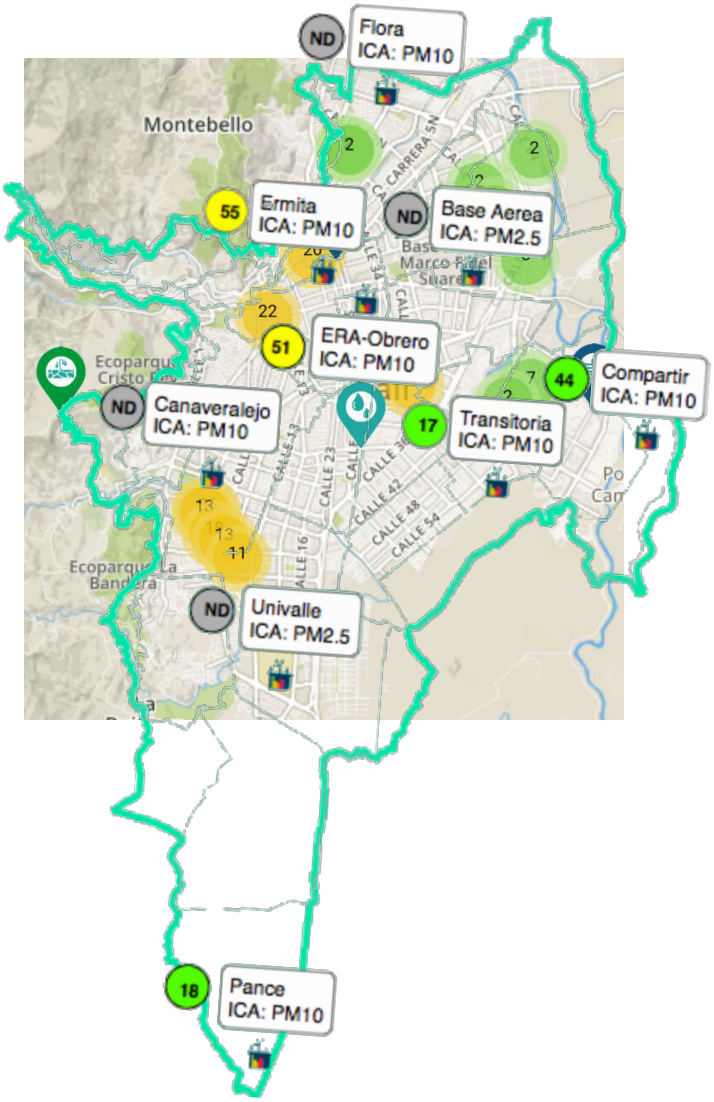


Fig. 12. Location of the air quality measuring stations compared to the places where citizens' reports are received.

the construction of comprehensive and efficient monitoring and environmental management systems in smart cities.

As a result, a roadmap is proposed that goes beyond the scope of this project and whose purpose is to establish a line of research in the long term:

- The results obtained should be integrated into the Urb@nEcoLife and CAMoN projects. As already indicated in section 3, the scope of the CrOWD project was not initially present in the roadmap of these projects. Therefore, the results of CrOWD should be integrated into this roadmap, which in turn should review its medium and long-term objectives.
- Dynamic optimizations of the WSN architecture should be taken into account in terms of the evolution of crowdsourcing. Environmental problems can have many causes and appear in different places as time passes. This fact should allow reconfigurations of the WSN deployments that adapt to changes in situations:
  - In the case of opting for the installation of sensors on transport lines, it can be decided on which transport lines it is optimal to ship the devices.
  - In static sensor deployments, the dynamic adjustment of the sampling rate can be performed so that those who remain in low interest areas remain off most of the time and achieve greater energy savings.
- One of the objectives of Urb@nEcoLife and CAMoN is to offer services based on data. The deployment of the WSN should be another system service in the integral monitoring and management system. That is, the optimized deployment of the WSN must be another service within the catalog of value added services that are built on the data obtained.
- Other open sources of information such as climate models, traffic information, health alerts, types of industries, among others, must be incorporated into the optimization model. This information would be complementary to that of crowdsourcing sources and should contribute to obtain better results.
- Optimization of the monitoring device: The selection of the sensors can be done based on crowdsourcing or information from open sources. That is, it is possible that certain environmental parameters are not relevant in an area for various reasons. Reducing the number of sensors allows to build devices at a lower cost and with longer lifetimes.

Acknowledgements

This research has been supported by projects: CAMoN (ref: Organicity Project –ID 645198– Open Call 2), funded by OrganiCity; Urb@nEcoLife (code DGICOCEIN-No. 613-621116-D41); and AIM, (ref. TEC2016- 76465-C2-1-R, AEI/FEDER, UE).

References

1. Akyildiz, I., Su, W., Sankarasubramaniam, Y., Cayirci, E.: A survey on sensor networks. Communications Magazine, IEEE **40**(8), 102–114 (2002). DOI 10.1109/MCOM.2002.1024422
2. Alliance, L.: What is LoRa? https://www.lora-alliance.org/what-is-lora (2018). Accedida: 01-05-2018

3. Bai, X., Kumar, S., Xuan, D., Yun, Z., Lai, T.H.: Deploying wireless sensors to achieve both coverage and connectivity. In: Proceedings of the 7th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing, MobiHoc '06, pp. 131–142. ACM, New York, NY, USA (2006). DOI 10.1145/1132905.1132921. URL http://doi.acm.org/10.1145/1132905.1132921
4. Guo, B., Wang, Z., Yu, Z., Wang, Y., Yen, N.Y., Huang, R., Zhou, X.: Mobile crowd sensing and computing: The review of an emerging human-powered sensing paradigm. ACM Comput. Surv. **48**(1), 7:1–7:31 (2015). DOI 10.1145/2794400. URL http://doi.acm.org/10.1145/2794400
5. He, T., Huang, C., Blum, B.M., Stankovic, J.A., Abdelzaher, T.: Range-free localization schemes for large scale sensor networks. In: Proceedings of the 9th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, MobiCom '03, pp. 81–95. ACM, New York, NY, USA (2003). DOI 10.1145/938985.938995. URL http://doi.acm.org/10.1145/938985.938995
6. Zúñiga Cañón, C., Asorey Cacheda, R., Largo Ortiz, J., Sinisterra González, A.: Work in progress: Compilation of environmental data through portable low-cost sensors with delay-tolerant mobile ad-hoc networks. In: 2017 IEEE 13th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob), pp. 212–217 (2017). DOI 10.1109/WiMOB.2017.8115842

Municipal solid waste management in smart cities: facility location of community bins

Diego G. Rossit[1], Sergio Nesmachnow[2], and Jamal Toutouh[3]

[1] DI, Universidad Nacional del Sur and CONICET, Argentina
diego.rossit@uns.edu.ar
[2] Universidad de la República, Uruguay
sergion@fing.edu.uy
[3] Universidad de Málaga, Spain
jamal@lcc.uma.es

Abstract. Residential garbage collection is an important urban issue to address in modern cities, being a key activity that explains a large proportion of budget expenses for local governments. Under the smart cities paradigm, specific solutions can be developed to plan a better garbage collection system, improving the quality of service provided to citizens and reducing costs. This article addresses the problem of selecting locations for community bins in a medium size Argentinian city, that stills uses a door-to-door system. An integer programming model is presented to locate community bins that minimize the installment cost while also maximize the days between two consecutive visit of the collection vehicle. Results demonstrate that the proposed model and the proposed resolution algorithm were able to provide a set of suitable solutions that can be used as a starting point for migrating from the current door-to-door system to a community bins system.

Keywords: Smart cities · Municipal solid waste · Multiobjetive optimization

1 Introduction

Urbanization has increased the pressure over governments to find intelligent and efficient solutions to provide high quality services to citizens. In this sense, Information and Communication Technologies (ICT) is a valid tool for the authorities to enhance the living conditions under the new paradigm of *smart cities*. Therefore, several urban services have been improved with the aid of ICTs. Recent examples have been reported for public transportation [22, 27], health services [33] and energy management [26], but also in other non-traditional fields, such as education [16]. ICTs have also been effectively applied to mitigate the environmental and economic problems in Municipal Solid Waste (MSW) management [19, 25, 34].

This article studies the problem of selecting the proper location of garbage community bins for a city with the aim of migrating from a door-to-door collection to a community bins system that is expected to be more efficient in terms

of logistic costs [2]. Particularly, a case of study of the city of Bahía Blanca, which is an important medium size city in the South of Argentina, is addressed in this work. The objective of migrating from the current door-to-door collection system to a community bin based one, where the citizens have to carry their waste to certain bins, is usually among the plans of the local authorities for reducing the collection complexity. Solutions that contribute to reduce logistics cost are of particular interest for Argentinian cities since they are extremely high in this country [4]. As stated, using a community bins system has certain advantages over the door-to-door system. However, the location of bins in an urban area is not a trivial problem if it is supposed to be efficient [34]. This is mainly due to the characteristic of the underlying optimization problem, which is a variation of the Capacitated Facility Location Problem (CFLP). CFLP has been proven to be NP-hard through a reduction to a *3-dimensional matching problem* (3DM) [6]. Besides, finding the ubity of garbage accumulation points have an extra difficulty associated with the conflicting relationships between the several criteria that are expected to be taken into account during the process. For example, containers should not be very far from the generators since this would provoke its misuse. On the other hand, a proper scheduling of collection vehicles should be established to avoid bins overflowing. Moreover, the frequency of garbage collection will have an impact on the necessary bin capacity.

The article is structured as follows. In Section 2, the mathematical formulation of the target problem and the main related work is presented. Section 3 describes the solution approach used for solving the proposed model. Then, in Section 4 the scenarios in which the model was applied and the analysis of the main results are presented. Finally, Section 5 outlines the main conclusions and formulates the lines for future work.

2 Problem description

This section describes the model for the problem addressed in this article, the proposed mathematical formulation and a review of relevant works from the related literature.

2.1 Problem model

The problem consists in locating garbage accumulation points (GAP) while optimizing two different criteria. The first criteria is to minimize the total investment cost, i.e., the cost of installing each individual bin. The second criteria is to enhance the 'autonomy' of the GAPs. Autonomy is related to the number of days that a GAP can wait between two consecutive visits of the collection vehicle (to empty the bins). Naturally, the larger number of bins a GAP has, the larger is the storage capacity and the larger is the period of autonomy. However, having many bins implies large investment to purchase the bins.

2.2 Mathematical formulation

The problem can be modeled as a an Integer Programming (IP) model by considering the following elements:

- A set $I = \{i_1, \ldots, i_{|I|}\}$ of potential GAPs for bins. Each GAP i has an available space Es_i for installing bins.
- A set $P = \{p_1, \ldots, p_{|P|}\}$ of generators. Following a usual approach in the related literature, nearby generators are grouped in clusters, assuming a similar behavior between elements in each cluster. The amount of waste produced by generator p (in volumetric units) is b_p. The distance from generator p to GAP i is $d_{p,i}$, and the maximum distance between any generator in P and its assigned GAP (in meters) is D.
- A set $J = \{j_1, \ldots, j_{|J|}\}$ of bin types. Each type has a given purchase price cin_j, capacity C_j, and required space for its installation e_j. The maximum number of bins of type j that is available is MB_j.
- A set $Y = \{y_1, \ldots, y_{|Y|}\}$ of collection frequencies profiles. These profiles are defined by parameter a_y that indicates the number of days among two consecutive visits of the collection vehicle.

The model is described in Equations 1-11, using the following variables:

- t_{ji} is the number of bins of type j installed in GAP i.
- x_{pi} is 1 if dwelling p is assigned to GAP i and 0 otherwise
- f_{iy} is 1 if frequency profile y (defined by parameter a_y) is used for GAP i and 0 otherwise.

$$\min \sum_{\substack{j \in J \\ i \in I}} (t_{ji}\ cin_j) \tag{1}$$

$$\min \frac{\sum_{\substack{i \in I \\ y \in Y}} \left(\frac{f_{iy}}{a_y}\right)}{|I|} \tag{2}$$

Subject to

$$\sum_{i \in I} (x_{pi}) = 1,\ \forall\ p \in P \tag{3}$$

$$\sum_{j \in J} (t_{ji} e_j) \leq Es_i,\ \forall\ i \in I \tag{4}$$

$$\sum_{\substack{p \in P \\ y \in Y}} (b_p x_{pi} f_{iy} a_y) \leq \sum_{j \in J} \left(cap_j t_{ji}\right),\ \forall\ i \in I \tag{5}$$

$$\sum_{y \in Y} f_{iy} \leq 1,\ \forall\ i \in I \tag{6}$$

$$|P| \sum_{y \in Y} f_{iy} \geq \sum_{y \in Y} x_{pi},\ \forall\ i \in I \tag{7}$$

$$d_{pi}x_{pi} \leq D,\ \forall\ p \in P,\ i \in I \tag{8}$$
$$x_{pi} \in \{0,1\}, \forall\ p \in P,\ i \in I \tag{9}$$
$$f_{iy} \in \{0,1\}, \forall\ i \in I, y \in Y \tag{10}$$
$$t_{ji} \in \mathbb{Z}_0^+, \forall\ j \in J,\ i \in I \tag{11}$$

There are two objective functions. Eq. (1) is the cost of the installed community bins and Eq. (2) is the average collection frequency of the set of GAPs (hereafter Obj_c and Obj_f, respectively) . Regarding constraints, Eq. (3) establishes that each dwelling should be assigned to a GAP. Eq. (4) ensures that the occupied space by the bins is not larger than the available space in a GAP. Eq. (5) limits the garbage assign to a GAP to the capacity of the installed bins in that GAP. Eq. (6) forces that only one frequency profile is chosen for a GAP. Eq. (7) establishes that if a dwelling is assigned to a GAP, that GAP has a collection frequency profile. Eq. (8) restricts the maximum distance between a dwelling and the assigned GAP to a certain threshold distance. Eqs. (9) and (10) define the binary nature of the variables x_{pi} and f_{iy}. Eq. (11) defines that t_{ji} is a non-negative integer variable.

The proposed model formulation is not linear due to the presence of Eq. (5). Although linearization is a common practice to handle nonlinear problems, the benefits of using linear equivalent forms can be offset if the transformation increases the number of integer variables since this is generally an indicator of the difficulty of the problem [14]. Therefore, the linearization technique proposed by Glover [14, 15], which does not increase the number of integer variables, is applied and Eq. (5) is replaced with Eqs. (12)–(16) through the definition of the continuous variable u_{piy}. Finally, the linear equivalent formulation of the model is composed by Eqs. (1)–(4) and (6)–(16).

$$\sum_{\substack{p\in P\\ y\in Y}} [b_p a_y (u_{piy} + f_{iy} - 1 + x_{pi})] \leq \sum_{j\in J} \left(cap_j t_{ji}\right),\ \forall\ i \in I \tag{12}$$
$$u_{piy} \geq 1 - x_{pi} - f_{iy},\ \forall\ p \in P,\ i \in I,\ y \in Y \tag{13}$$
$$u_{piy} \leq 1 - f_{iy},\ \forall\ p \in P,\ i \in I,\ y \in Y \tag{14}$$
$$u_{piy} \leq 1 - x_{pi},\ \forall\ p \in P,\ i \in I,\ y \in Y \tag{15}$$
$$u_{piy} \geq 0,\ \forall\ p \in P,\ i \in I,\ y \in Y \tag{16}$$

2.3 Related work

Few articles have addressed the GAPs location problem using exact methods. Tralhao et al. [35] solved the problem of locating bins in the city of Coimbra, Portugal, considering four different objectives to minimize: the total cost of the system, the average distance between a generator and its assigned container, and the number of generators within the "push" and "pull" thresholds distances of an open candidate site. These lasts are related to the semi-obnoxiousness of

the GAPs since citizens do not want them very near to reduce inconvenient environmental costs but neither very far to reduce the transportation costs. The authors used the goal programming and the weighted sum to obtain a set of multiobjective solutions. A similar problem was solved by Coutinho et al. [7], applying the ε-constraint method but only considering two objectives: the total investment cost and a novel "dissatisfaction function" that takes into account the semi-obnoxiousness of the waste bins. Kao and Lin [20] presented three different monobjective models to solve the GAPs location problem in Hsinchu, Taiwan. These models are compared according to the average distance between generators and assigned containers. Hemmelmayr et al. [18] solved the GAP location problem with the aim of minimizing the installment costs using CPLEX inside a more generic model that also considers the routing scheduling of collection vehicle. Similarly, in Lin et al. [21] the problem of locating GAPs was solved with CPLEX in a general framework that also defines the routing plan. Ghiani et al. [12] presented an integer model that minimizes the total number of opened GAP in different scenarios of the city of Nardò, Italy. A modified version of this model, that prevents an opened GAP from having incompatible bins (i.e., bins that require a different vehicle to be emptied), was applied by Ghiani et al. [13]. This modification simplifies the posterior collection logistics since no GAP has to be visited by more than one type of vehicle.

Since facility location problems are know to be NP-hard, several authors have addressed them heuristically [30]. For example, our previous work [34] proposed a set of PageRank heuristics and metaheuristics to solve the GAP location problem in some scenarios of the city of Montevideo considering the objectives of minimizing the investment cost and maximizing the collected garbage. Di Felice [8] presented a two-phase heuristic that firstly locates the GAP in the urban network and, then, determines the size of the containers that are going to be assigned to those GAPs. Chang and Wei [5] proposed a fuzzy multi-objective genetic algorithm to solve the recycling drop-off sites allocation and routing collection in Kaohsiung, Taiwan.

In Argentina, some works have proposed improving the routing collection plans in MSW management [2, 3] but few applications of ICTs have been proposed for bins location. Our previous works [32, 31] applied a weighted sum approach and AUGMECON, considering the cost of the system and minimizing the average distance to the generators. Therefore, there is still room to improve collection network in Argentina through the application of ICTs.

The research reported in this article contributes with a mathematical formulation for solving the problem of locating GAPs while considering the objective of maximizing the autonomy of the GAPs, through the frequency objective as a way of bounding the posterior collection costs. Moreover, this objective is considered jointly with the objective of minimizing the installment cost. Although the visit frequency of the GAPs has been considered in previous integral approaches [18] for location-routing problems, the assignment of generators to GAPs has not been taking into account. Furthermore, in this article a real case considering the scenario from the Argentinian city of Bahía Blanca is solved.

3 Solution approach: an adaptation of the augmented ε-constraint method

The proposed solution approach is based on the augmented ϵ-constraint method (AUGMECON). AUGMECON was first presented by Mavrotas in 2009 [23] and later improved by Mavrotas and Florios [24], in order to addressed some of the drawbacks of the traditional ϵ-constraint approach, originally developed by Haimes et al. [17]. One of the main highlights of AUGMECON is that it successfully reduces the required computing time to solve complex problems, through the avoidance of weakly efficient or repeated solutions.

AUGMECON requires as input the efficient range of the objective functions, i.e., the *nadir* and *ideal* values that each objective assumes within the Pareto front. For the problem studied in this article, since there are only two objectives involved, a single objective optimization approach can be used to find the nadir and ideal value of each objective, as proposed by Ehrgott and Ryan [10]. However, in bicriteria optimization problems, the ranges obtained using single objective optimization are the efficient ranges of each objective only if there are no alternative solutions [1]. Mavrotas proposed computing the nadir and ideal values of the objectives over the efficient set using lexicographic optimization [23]. Nonetheless, lexicographic optimization evidenced highly time consuming for the problem addressed in this paper. This approach roughly consists in optimizing the set of criteria sequentially providing that the already optimized criteria in the previous runs do not get a worse value in the subsequent runs. In a bicriteria problem, as is the case of this paper, basically this implies solving a plain single objective optimization for one of the objectives and, then, solving a second problem to optimize the second criteria subjected to not deteriorating the first criteria, which is added as a constraint to the second model. This second problem is a more constrained problem than directly optimizing the second criteria in a single objective fashion and, therefore, can only be equally (if not more) difficult to solve than the single objective model.

To overcome that efficiency problem, this article proposes a less computational expensive procedure to approximate the efficient range of the objectives, using weighted sum to 'filter' the single objective optimization results. In a second stage, a largely unbalanced vector of weights is used: the function is strongly biased towards the criteria that is optimized but the second criteria still has a small positive weight in order to avoid weakly efficient solutions. Therefore, conversely to lexicographic optimization, this approach does not increase the original set of constraints of the problem. Moreover, differently to the previous proposal by Tralhao et al. [35], the values of the criteria in the weighted sum are normalized with the results of the single objective optimization in order to make this bias significant since criteria have different measure units and, thus, their ranges may have different absolute values. Next section evaluates the three studied approaches to estimate the efficient ranges of the criteria: single objective optimization, biased weighted sum, and lexicographic optimization.

4 Experimental analysis

This section describes the experimental analysis of the proposed approach for GAP location. Section 4.1 presents the development and execution platform. The real scenario and different problem instances considered in the experiments are described in Section 4.2. Finally, Section 4.3 reports the numerical results and their analysis.

4.1 Development and execution platform

The experimental analysis was performed on a Core i7 processor, with 16 GB of RAM memory, in a Windows 10 environment. The problem was modeled in Visual Studio C++ and the resolution was performed with the parallel mode of CPLEX 12.7.1. as the IP solver through the use of Concert Technology to link Visual Studio C++ and CPLEX.

4.2 Scenarios: the city of Bahía Blanca

The scenario is based on a real location, "Barrio Universitario", a densely populated neighborhood of Bahía Blanca, shown in Fig. 1. As regard to the input data for the model presented in Section 2.2, the garbage generation rate (b_p) is retrieved from a report that considered the particular characteristics of this city [29]. The density of garbage, which is required to estimate the capacity of the bins in kilograms of waste, was taken from a recent study carried out in Argentina [28].

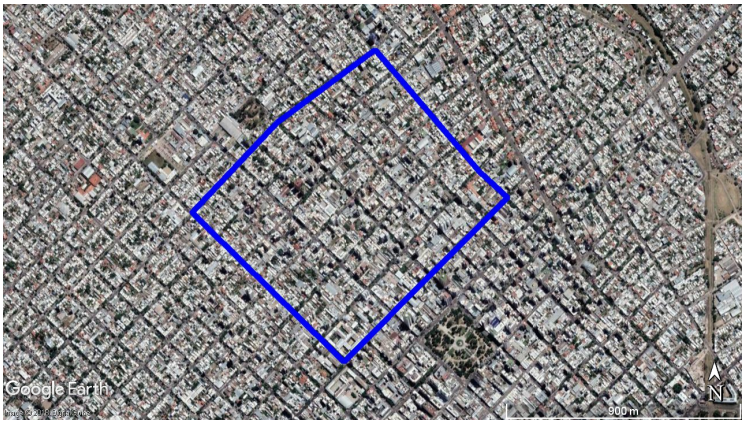


Fig. 1. Studied area ("Barrio Universitario") in Bahía Blanca. Base image: Google Earth Pro 7.3.1

The population density (per square block) was obtained by analyzing the information of the Argentinian national census [9]. This study was carried out

in collaboration with the local government. The set of frequency profiles is composed by three alternatives. If a GAP is opened, it can be emptied either every day ($a_y = 1$), every two days ($a_y = 2$) or every three days ($a_y = 3$). Regarding to the bins types, three different classes of bins are considered (j_1, j_2, and j_3, respectively). The associated parameters of these three classes are: capacity (cap_j) of 1, 2, and 3 m^3; required space (e_j) of 1, 2, and 3 m^2; and installation cost (cin_j) of 100, 180, and 250 monetary units. The available space in a GAP to install containers (Es_i) is equal to 5 m^2. The generators in the area of study were clustered in eighty-eight groups (Fig. 2).

The spatial information was organized using QGIS 2.18.6 and the urban walking distances (d_{pi}) were calculated through an adapted version of the *osmar* package of R developed by Eugster and Schlesinger [11]. This package retrieves information directly from OpenStreetMap[4].

Three different scenarios were considered in our experiments: the *normal demand scenario*, with the waste generation rate estimated by the authorities [29], the *demanding scenario*, and the *undemanding scenario*, with generation rates 20% larger and 20% smaller than the one defined in the *normal demand scenario*, respectively. These 20% of increment and reduction in the normal waste generation rate are in line with the variations along the year presented in the surveys provided by the practitioners.

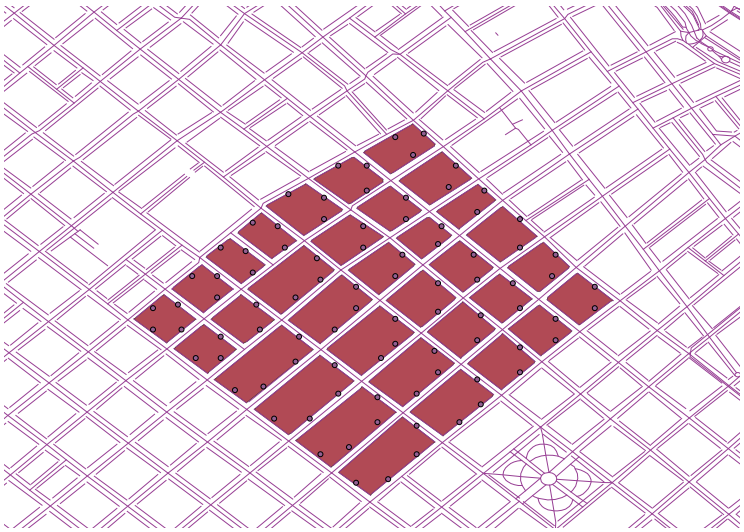


Fig. 2. Location of potential GAPs in the studied area ("Barrio Universitario" in Bahía Blanca)

[4] OpenStreetMap Website - `https://www.openstreetmap.org/`

4.3 Numerical results

Table 1 reports the results of calculating the objectives ranges with monobjective optimization, biased weighted sum, and lexicographic optimization for the three studied scenarios. The table presents the method used, the optimized objective, the obtained values of both objectives, and the CPU time for each execution. The optimized objective in the biased weighted sum refers to the objective with the largest weight, while in lexicographic optimization refers to the criteria taken into account in the first place during the optimization. The biased weighted sum was able to improve the lower bounds of the nadir values of the monobjective optimization for the three evaluated scenarios.

Table 1. Payoff solutions.

Method	Optimized objective	Obj_c	Obj_f	CPU time (s)
		Normal scenario		
Monobjective optimization	Obj_c	0.104167	44000	4205.94
	Obj_f	0.687500	3880	4267.95
Weighted sum	Obj_c	0.104167	5710	4202.16
	Obj_f	0.181818	4060	4202.16
Lexicographic optimization	Obj_c	*No feasible solution found*		
	Obj_f	0.181818	3880	4209.72
		Demanding scenario		
Monobjective optimization	Obj_c	0.126894	44000	4204.70
	Obj_f	0.518939	4710	4260.51
Weighted sum	Obj_c	0.126894	8040	4206.59
	Obj_f	0.204545	4710	4206.09
Lexicographic optimization	Obj_c	*No feasible solution found*		
	Obj_f	0.193182	4710	4207.41
		Undemanding scenario		
Monobjective optimization	Obj_c	0.083333	44000	4205.94
	Obj_f	0.318182	3140	4267.95
Weighted sum	Obj_c	0.083333	7230	4230.24
	Obj_f	0.159091	3140	4200.72
Lexicographic optimization	Obj_c	*No feasible solution found*		
	Obj_f	0.106061	3140	4209.72

According to the results in Table 1, lexicographic optimization was not able to find a feasible solution for the scenarios when the order of the optimized objectives was first Obj_c and then Obj_f within the time limit. The main reason for this

might be based on the aforementioned characteristics of lexicographic approach, which is able to solve more constrained models. In this case, the monobjective problem of minimizing Obj_f plus an additional constraint prevents the deterioration of Obj_c. Therefore, for the proposed scenarios, this enlarged problem seems to be harder to be solved than the straightforward monobjective optimization one of Obj_f, which was already a NP-hard CFLP. Thus, the efficiency of the solver to obtain feasible solutions is reduced. Furthermore, this ordering of objectives is more challenging for the solver than when Obj_f is the first stage, since in this last case, CPLEX do find a feasible solution within the time limit.

AUGMECON uses an input parameter that sets the maximum number of solutions to be search in the solution space, known as *gridpoints* [23, 24]. This is an upper bound because during the execution AUGMECON can consider convenient to bypass some of these gridpoints if one of the two following situations arise. AUGMECON considers that the next run will obtain the same solution and, therefore, will only waste computing time to find repeated information. Or, since a previous trial could not find a feasible solution, AUGMECON considers that the following trials will be also unsuccessful to find a feasible solution. This last situation is related to structure of the AUGMECON algorithm, in which the trials are performed in an increasing grade of complexity (the bound of the constrained objective becomes tighter in each trial).

For the three scenarios the gridpoints were set to 20. In the case of the *demanding scenario*, AUGMECON bypasses 11 gridpoints to avoid repeated solutions. Moreover, 3 trials were avoided since the solver was not able to find a feasible solution within the time limit. In the *normal scenario*, the bypasses to avoid repetition were 4 and the unperformed trials because not been able to find a feasible solution were 9. Finally in the *undemanding scenario*, these numbers were 3 and 10, respectively. Table 2 summarizes the solutions obtained with AUGMECON : the values of the objectives, the computing times and whether these solutions are dominated by another solution (D) or not (Non-D) . A solution is dominated by another solution when this last one has a better value in at least one of the optimization criteria and not a worse value in any of the other optimization criteria. The AUGMECON guarantees obtaining a non-dominated solution if and only if the problem is solved to optimality. . As it can be seen from the Table 2 none of the solutions were solved to optimality since they were aborted due to time limit, which is again probably related with the complexity of the underlying facility location problem.

Table 2. Multiobjective solutions for the scenarios of the city of Bahía Blanca.

Solution id	Obj_c	Obj_f	CPU time (s)	Dominance
Normal scenario				
1	0.128788	4800	4207.63	Non-D
2	0.111742	4900	4204.45	Non-D
3	0.107955	5080	4202.89	Non-D
4	0.106061	5230	4203.36	Non-D
5	0.106061	5360	4206.07	D
6	0.104167	5510	4203.56	Non-D
Demanding scenario				
3	0.130682	5700	4208.45	Non-D
4	0.125	6020	4204.72	Non-D
4	0.126894	7120	4207.63	D
5	0.126894	7400	4205.05	D
6	0.128788	7830	4210.22	D
7	0.128788	8190	4207.14	D
8	0.125	9320	4208.45	D
Undemanding scenario				
1	0.102273	3500	4200.50	Non-D
2	0.104167	3630	4204.91	D
3	0.092803	3690	4210.39	Non-D
4	0.090909	3790	4203.47	Non-D
5	0.100379	3850	4208.70	D
6	0.089015	3890	4229.86	Non-D
7	0.085227	4190	4206.56	Non-D

5 Conclusions and future work

Urban waste management is a complex issue for local governments that usually struggle with high logistic costs. The research reported in this article focused on the initial stage of the reverse logistic chain of municipal solid waste.

Particularly, a mathematical formulation for defining the location of garbage accumulation points in a densely populated urban area while considering the minimization of both installment cost and the required frequency of visits of the collection vehicle to empty the bins is proposed. This model is solved for real scenarios of the Argentinian city of Bahía Blanca, where the government is interested in migrating from a door-to-door system to a community bins based one to simplify the collection logistic.

A set of multiobjective solutions for the problem were obtained applying the augmented ε-constraint method (AUGMECON). Moreover, a novel variation for finding the efficient range of the objectives (which is an input of the AUGMECON) is presented in order to deal with this computationally challenging facility location problem. Another important conclusion is that this work was

mainly performed with free software to obtain and process geographic information (OpenStreetMap, R packages and QGIS) This represents an asset for local authorities of developing countries that generally have a short budget to incorporate ICTs in public services, as is the case of the Argentinian city of Bahía Blanca. Only the optimizer solver, CPLEX, requires a paid license.

The main lines for future work are focused on addressing more complex scenarios of the city of Bahía Blanca, either by analyzing larger urban sectors of the city or by considering the installment of different containers for different types of waste to allow source classification and facilitate posterior recycling. These larger scenarios may require the application of heuristic algorithms and the exact algorithm that is proposed in this paper can be used for validating the heuristic approaches. Since one of the main characteristics of this work it is that it has been done mostly with free software, tests performance on CBC free solver from the COIN-OR project can be performed to analyze the replacement of CPLEX. Another relevant line to research is to continue experimenting different approaches for finding the efficient ranges of the objectives in computationally complex problems.

References

1. Beeson, R.M.: Optimization with respect to multiple criteria. Ph.D. thesis, University of Southern California, United States of America (June 1972)
2. Bonomo, F., Durán, G., Larumbe, F., Marenco, J.: A method for optimizing waste collection using mathematical programming: a Buenos Aires case study. Waste Management & Research **30**(3), 311–324 (2012)
3. Braier, G., Durán, G., Marenco, J., Wesner, F.: An integer programming approach to a real-world recyclable waste collection problem in argentina. Waste Management & Research **35**(5), 525–533 (2017)
4. Broz, D., Rossit, D., Cavallin, C.: The Argentinian forest sector: opportunities and challenges in supply chain management. Uncertain Supply Chain Management **6**(4), 375–392 (2018)
5. Chang, N.B., Wei, Y.: Siting recycling drop-off stations in urban area by genetic algorithm-based fuzzy multiobjective nonlinear integer programming modeling. Fuzzy Sets and Systems **114**(1), 133–149 (2000)
6. Cornuéjols, G., Sridharan, R., Thizy, J.M.: A comparison of heuristics and relaxations for the Capacitated Plant Location Problem. European Journal of Operational Research **50**(3), 280–297 (1991)
7. Coutinho-Rodrigues, J., Tralhão, L., Alçada-Almeida, L.: A bi-objective modeling approach applied to an urban semi-desirable facility location problem. European Journal of Operational Research **223**(1), 203–213 (2012)
8. Di Felice, P.: Integration of spatial and descriptive information to solve the urban waste accumulation problem. Procedia-Social and Behavioral Sciences **147**, 182–188 (2014)
9. Dirección Provincial de Estadística de la Provincia de Buenos Aires, Argentina: Censo 2010 Provincia de Buenos Aires Resultados Definitivos por Partido (2010)
10. Ehrgott, M., Ryan, D.M.: Constructing robust crew schedules with bicriteria optimization. Journal of Multi-Criteria Decision Analysis **11**(3), 139–150 (2002)

11. Eugster, M.J.A., Schlesinger, T.: osmar: OpenStreetMap and R. The R Journal **5**(1), 53–63 (2013)
12. Ghiani, G., Laganà, D., Manni, E., Triki, C.: Capacitated location of collection sites in an urban waste management system. Waste Management **32**(7), 1291–1296 (2012)
13. Ghiani, G., Manni, A., Manni, E., Toraldo, M.: The impact of an efficient collection sites location on the zoning phase in municipal solid waste management. Waste Management **34**(11), 1949–1956 (2014)
14. Glover, F.: Improved linear integer programming formulations of nonlinear integer problems. Management Science **22**(4), 455–460 (1975)
15. Glover, F.: An improved MIP formulation for products of discrete and continuous variables. Journal of Information and Optimization Sciences **5**(1), 69–71 (1984)
16. Gómez, J., Huete, J.F., Hoyos, O., Perez, L., Grigori, D.: Interaction system based on internet of things as support for education. Procedia Computer Science **21**, 132–139 (2013)
17. Haimes, Y.Y., Lasdon, L.S., Wismer, D.A.: On a bicriterion formulation of the problems of integrated system identification and system optimization. IEEE transactions on systems, man, and cybernetics **1**(3), 296–297 (1971)
18. Hemmelmayr, V.C., Doerner, K.F., Hartl, R.F., Vigo, D.: Models and algorithms for the integrated planning of bin allocation and vehicle routing in solid waste management. Transportation Science **48**(1), 103–120 (2013)
19. Hoornweg, D., Bhada-Tata, P.: What a waste: a Global Review of Solid Waste Management. Urban Development Series Knowledge Papers 15, World Bank, Washington, United States (2012)
20. Kao, J.J., Lin, T.I.: Shortest service location model for planning waste pickup locations. Journal of the Air & Waste Management Association **52**(5), 585–592 (2002)
21. Lin, H.Y., Tsai, Z.P., Chen, G.H., Kao, J.J.: A model for the implementation of a two-shift municipal solid waste and recyclable material collection plan that offers greater convenience to residents. Journal of the Air & Waste Management Association **61**(1), 55–62 (2011)
22. Massobrio, R., Toutouh, J., Nesmachnow, S., Alba, E.: Infrastructure deployment in vehicular communication networks using a parallel multiobjective evolutionary algorithm. International Journal of Intelligent Systems **32**(8), 801–829 (2017)
23. Mavrotas, G.: Effective implementation of the ε-constraint method in multi-objective mathematical programming problems. Applied mathematics and computation **213**(2), 455–465 (2009)
24. Mavrotas, G., Florios, K.: An improved version of the augmented ε-constraint method (AUGMECON2) for finding the exact pareto set in multi-objective integer programming problems. Applied Mathematics and Computation **219**(18), 9652–9669 (2013)
25. Nesmachnow, S., Rossit, D., Toutouth, J.: Comparison of Multiobjective Evolutionary Algorithms for Prioritized Urban Waste Collection in Montevideo, Uruguay. Electronic Notes in Discrete Mathematics pp. 89–96 (2018), in press
26. Orsi, E., Nesmachnow, S.: Smart home energy planning using iot and the cloud. In: URUCON IEEE. pp. 1–4 (October 2017)
27. Peña, D., Tchernykh, A., Nesmachnow, S., Massobrio, R., Feoktistov, A., Bychkov, I., Radchenko, G., Drozdov, A.Y., Garichev, S.N.: Operating cost and quality of service optimization for multi-vehicle-type timetabling for urban bus systems. Journal of Parallel and Distributed Computing (2018)

28. Pettigiani, E., Muzlera, A., Antonini, S.: Caracterización de residuos sólidos urbanos domiciliarios en Unquillo, Córdoba. In: III Jornadas Nacionales GIRSU 2013. pp. 5–17. Instituto Nacional de Tecnología Industrial, Rawson, Argentina (2013)
29. Planta Piloto de Ingeniería Química UNS-CONICET: Análisis estadístico de los residuos sólidos domiciliarios de Bahía Blanca (February 2013)
30. Purkayastha, D., Majumder, M., Chakrabarti, S.: Collection and recycle bin location-allocation problem in solid waste management: A review. Pollution **1**(2), 175–191 (2015)
31. Rossit, D., Tohmé, F., Frutos, M., Broz, D.: An application of the augmented ε-constraint method to design a municipal sorted waste collection system. Decision Science Letters **6**(4), 323–336 (2017)
32. Rossit, D.G., Broz, D., Rossit, D.A., Frutos, M., Tohmé, F.: Una herramienta logística para la localización de contenedores de residuos separados en origen. In: Mazzeo, N.M., Muzlera Klappenbach, A.M.M. (eds.) Avances en Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos 2014-15, pp. 50–69. Instituto Nacional de Tecnología Industrial, Buenos Aires, Argentina (2015)
33. Solanas, A., Patsakis, C., Conti, M., Vlachos, I.S., Ramos, V., Falcone, F., Postolache, O., Pérez-Martínez, P.A., Di Pietro, R., Perrea, D.N., et al.: Smart health: a context-aware health paradigm within smart cities. IEEE Communications Magazine **52**(8), 74–81 (2014)
34. Toutouth, J., Rossit, D., Nesmachnow, S.: Computational intelligence for locating garbage accumulation points in urban scenarios. Lecture Notes in Computer Science (2018), in press
35. Tralhão, L., Coutinho-Rodrigues, J., Alçada-Almeida, L.: A multiobjective modeling approach to locate multi-compartment containers for urban-sorted waste. Waste Management **30**(12), 2418–2429 (2010)

Computational intelligence for detecting pedestrian movement patterns

Juan P. Chavat and Sergio Nesmachnow[0000−0002−8146−4012]

Universidad de la República, Montevideo, Uruguay
{juan.pablo.chavat,sergion}@fing.edu.uy

Abstract. This article presents a system that uses computational intelligence to detect pedestrian movement patterns by applying image processing and pattern detection. The system is capable of processing in real time multiple image/video sources and it is based on a pipes and filters architecture that makes it easy to evaluate different computational intelligence techniques. The system counts with two main stages: the first stage extracts the relevant features of images and the second stage is responsible for the detection of patterns. The experimental analysis performed over more than 1450 problem instances covers the two main stages of the system. The system was evaluated using PETS09-S2L1 videos and the results were compared with part of the MOTChallenge benchmark results. Results suggest that the proposed system is competitive, yet simpler, than other similar software methods.

Keywords: Computational intelligence · image processing · pedestrian movement patterns · surveillance cameras.

1 Introduction

Nowadays, there is a growing trend in the installation of security and surveillance cameras, with the main argument of increasing the level of security in public spaces and private businesses. Traditional security cameras do not include real time systems for detecting incidences without an operational center to process the images and take actions on certain events. Nowadays, the kind of operational center needed to process security cameras images are populated by persons with the role of visualizing agents. The visualizing agents constantly observe an amount of image sources (security cameras) and generate alerts in case an event of interest is detected [1].

Because of the high costs of the personnel, most operational centers assign to each visualizing agent several image sources, which exceeds their capacity. As a consequence, there is either a degradation of the level of global attention or the visualizing agent is forced to pay attention just to a reduced number of image sources at a time, ignoring events from the rest of the sources. In addition, due to the monotony of the task, the visualizing agents experience boredom and/or fatigue, causing poorer results.

This article presents an approach applying computational intelligence to overcome the attentional problem of human visualizing agents that works in operational centers. A system capable of processing in real time multiple image/video sources is proposed to help human visualizing agents in the process of detecting-pedestrian movement patterns. It is based on a filter and pipe architecture that makes it easy to exchange and evaluate different computational intelligence techniques in each stage of the process. The system is comprised of two main stages. In the first stage, filtering is applied to images from multiple sources, extracting relevant features of images and discarding not interesting images, according to pre-loaded rules. This stage allows visualizing agents to focus their attention efficiently. The second stage is responsible for the detection of patterns, taking into account typical situations arising in surveillance that are worth identifying (*e.g.*, people running, agglomerations, prowling, etc.). The system architecture and design allow extending its capabilities without significant effort, as it is easily adaptable for detection of different types of events of interest.

The article is structured as follows. Section 2 contains a brief theoretical introduction to image processing and pattern detection. A review of related work on recognition and pattern detection/tracking on surveillance systems in presented in Section 3. Section 4 presents the general architecture and design of the system. The main implementation details of the proposed system are described in Section 5. Sample results from the evaluation are presented in Section 6. Finally, Section 7 presents the conclusions and the main lines for future work.

2 Image processing and pattern detection

Image processing is defined as the process of applying techniques to modify, improve, or obtain information from images [2]. A standard image processing flow includes five steps (the output of each phase is the input of the next):

1. *capture* consists in acquiring raw images from a source (*e.g.* surveillance cameras). Depending on the device used, noise and other type of degradations such as blurring, high contrast of the scene, etc. are added to the image [3];
2. *pre-proceessing* applies methods to remove or reduce the information in the image that is not of interest for solving the problem. Pre-processing tries to improve those characteristics of the image that are important for solving the problem (*e.g.*, contour and shine), by using mathematical tools.
3. *segmentation* splits an image into regions that represents different objects or background, based on its contour, connectivity, or in pixel based characteristics (*e.g.*, shades of gray, textures, gradient magnitude, etc.). Some authors recognizes that segmentation algorithms focus in two properties: discontinuity and similarity, while others adds a third property: connectivity. The output of this step is a binary representation of the original image.
4. *features extraction* consists in finding, selecting, and extracting relevant features of an image, which allow identifying objects of interest for the problem.
5. *object identification* categorizes the set of features extracted in the previous step, by using different decision models, such as supervised classifiers.

Pattern detection is the study of how computer programs can observe a context, learn, and classify patterns of interest, allowing to take intelligent decisions [4]. A pattern detection system partitions the universe of classes and assigns elements to classes depending on a set of characteristics of each element (the characteristics pattern). When patterns are unknown a priori, the process is called *pattern recognition*; when the patterns are known, the process is called *pattern matching*. The pattern detection process usually consists of three stages:

1. *segmentation*, similar to image processing, the goal of this stage is to simplify the input, resulting in information that is easier to process.
2. *feature extraction* is applied to extract relevant information about specific objects, remove redundant/irrelevant information in order to reduce the problem. Quantitative (*e.g.*: speed, distance, etc) or qualitative (*e.g.*, occupation, sex, etc) features are used to build a vector of features. The goal is to select a subset of features (from the original set) in order to optimize a predefined target function. Feature selection can be done by statistical techniques and usually requires a deep knowledge of the problem. Selection features methods consist of three components: at least one evaluation criterion, a procedure or search algorithm and a stop criterion.
3. *classification* assigns features to specific classes. The performance of classifiers depends on the quality and number of extracted features. There are two main groups of classifiers: *supervised*, and *unsupervised* [5]. Supervised classifiers are based on a set of elements (*training data*) whose class is previously known by the classifier. Some typical supervised methods are Bayesian, Support Vector Machine, k-nearest neighbors (k-NN) and neural networks, among others [6]. Unsupervised classifiers tries to discover the classes of a given problem from a set of elements whose classes are unknown. The number of classes to be discover can be fixed or left free, depending exclusively on the datasets. Some typical unsupervised methods are Simple Link, ISODATA and k-means, among others [6].

The proposed system applies in a first step image processing techniques to extract a set of features from the scene and detect objects of interest. In a second step, the system applies pattern detection techniques over objects of interest detected in the previous step.

3 Related works

Valera and Velastin [7] identified important issues in intelligent surveillance systems, including: object recognition, detection and tracking of movement patterns, and behavior analysis. Systems were classified in three generations: 1) analog systems that are not easy to distribute; 2) automatic systems using computer vision, increasing the surveillance efficiency by event detection; and 3) distributed automatic systems combining sensors, robust tracking algorithms, and optimized big data management. The system proposed in our research is within the third generation, as complex pattern detection methods are included.

Piccardi [8] described the main features of seven background subtraction methods and analyzed their performance (processing speed, memory utilization and precision). Results showed that Running Gaussian Average obtained the best processing speed and the lower memory utilization, while Mixture of Gaussians and Kernel Density Estimation were the best methods regarding precision.

Lopez [9] proposed detecting apparent movement on images (caused by camera movements) using global alignment methods. The system obtains an aligned image without apparent movement and both original and aligned images are sent to a segmentation module that applies background subtraction, labeling, and grouping. The output of segmentation is a set of *blobs* of interest. Blobs are sent to the tracking module that applies filters to detect movement. Results close to 90% were achieved without tracking and almost 100% using tracking.

The counting system by Lefloch [10] applied background subtraction to determine which pixels belong to the bottom and to the front of the area that has movement. Then, morphological operations (*e.g.*, erosion, dilatation, opening, and closure) were applied to eliminate noise and also small, isolated areas that exhibit minimal movement. The resulting image was sent to a stage that detects contiguous pixels and calculates its bounding box. Bounding boxes that potentially contained people were identified.

Rodriguez et al. [11] proposed detecting and tracking people in very dense crowds, where occlusion and change of location pose big challenges. An object detector, trained to detect human heads, and density estimation algorithms, which provide information about the number of persons within a region, were applied. The detector generated a map that contains scores that indicate the possible presence of people. The map of scores was combined with data obtained by the density estimation algorithms to obtain accurate detection results.

Leach et al. [12] studied the detection of subtle behavior anomalies, by processing social signals, based on that two individuals who share trajectories have similarities and a 'social dependency'. Experiments were performed on PETS 2007 and Oxford datasets, improving over methods that do not take into account the social context. These results suggest that inferring social connections between people helps improving decision making.

Cho and Kang [13] detected abnormal behavior by studying group interaction. Static agents (to calculate speed and direction of background objects), and dynamic agents (to calculate social interaction between neighbors using a Social interaction Force Magnitude (SFM)) were used. The proposed system outperformed the SFM method over PETS 2009 and UCSD datasets.

Zhu et al. [14] proposed detecting anomalies using low- or medium-level visual information from surrounding regions. Local context information and a feature descriptor was used to describe the movement information and extract dense trajectories, preferably with noise screening. The system was evaluated on UCSD Ped1, Ped2, and Subway datasets, obtaining better results than previously developed methods, mainly due to proper use of context information.

The analysis of related works showed that there is still room to contribute regarding efficient systems for detecting pedestrian movement patterns.

4 The proposed detection system

This section describes the proposed pedestrian patterns detection system.

4.1 Architecture and design

The proposed must be able to collect images from different data sources. In turn, the architecture must be flexible enough to allow replacing or adding new algorithms without significant effort. To assure efficiency, the concurrent processing of multiple data sources must be supported. Taking into account the review of related works, an architecture based on *pipes* and *filters* [15] is proposed. The processes applied on the images are independent of each other and they adapt correctly to a chain pattern [10,7].

The system consists of two main modules. The *recognition and tracking* module is responsible for detecting and monitoring pedestrians (objects of interest); the *pattern detection* module analyzes the results of the first module to detect patterns based on (recent) historical information. Both modules support multiple concurrent executions using multithreading. The pattern detection module supports multiple sources of data. The system also includes three auxiliary modules: *control panel*, *instance launcher* and *events generator*. The system modules and the exchanged information are described in Figure 1.

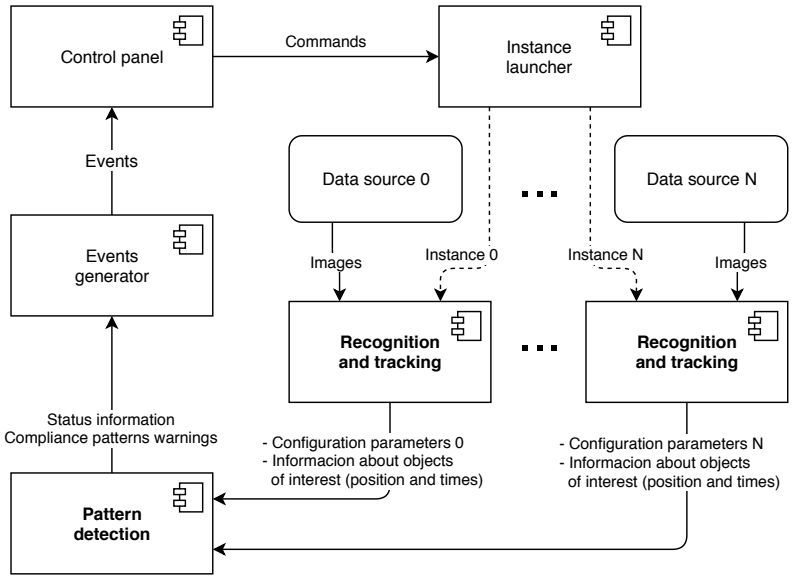


Fig. 1: Diagram of the architecture of the proposed system

Advanced Message Queuing Protocol (AMQP) protocol is used for communications between modules. AMQP is an open and secure protocol that guarantees delivery on time (or the consequent expiration), uniqueness, and correct ordering of messages, and also data integrity. The following subsections describe each module of the system.

4.2 Recognition and tracking module

The recognition and tracking module consists of four stages, arranged in pipes and filters. The first filter receives raw images and applies background subtraction, resulting in a binary image. The second filter takes binary images, detects blobs (set of adjacent pixels that belongs to the front of the image) and transfers the set of blobs to the blobs filter, which discards those blobs that do not contain objects of interest and adds spatial information to those relevant blobs. The last stage takes the information of the objects of interest in the image space and associates each one of them to the position of previously detected objects; thus, calculating the movement of each object. The different stages that compose the tracking and recognizing module are presented in Figure 2.

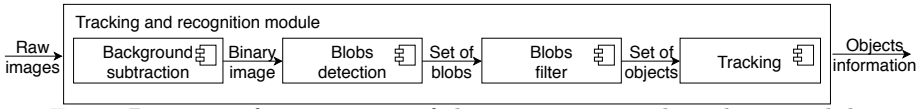


Fig. 2: Diagram of components of the recognition and tracking module

4.3 Pattern detection module

The pattern detection module receives information of objects of interest from multiple instances of the recognition and tracking module. Data is stored in a repository that contains the recent history for each object. Periodically, the module process the last entries for each object to identify a set of features, called *primitives*, which represent basic characteristics of the objects, depending on the movement speed, direction, or another attribute(s) of the object. A sequence of primitives plus a set of associated properties' values define a *pattern*.

There are single and multi-target primitives. Single-target primitives takes into account only one object of interest, ignoring the rest of objects in the scene, while multi-target primitives takes into account multiple objects in the scene. For example, single-target primitives can determine if a person is standing, walking, or running, depending only on the speed of movement of that person. On the other hand, a multi-target primitive can detect an agglomeration depending on the position of a group of persons for a period of time.

A specific method for patterns detection, based on the work by van Huis et al. [16] is implemented. Patterns detection takes into account the 'proximity' between an identified sequence of primitives and a set of previously established patterns. Proximity is evaluated using an error function that applies the concept of temporal distance, *i.e.*, the total time of primitives within a sequence that are not included in the reference pattern.

Reference patterns are integrated to the system dynamically. For each primitive that integrates a pattern, a quantifier and a value are defined. For example, a primitive that take into account the movement speed is fulfilled within a pattern if a pedestrian walk with a movement speed greater or equal to (*quantifier*) 5 kilometers per hour (*value*).

4.4 Auxiliary modules

Three auxiliary modules allow simplifying the operation of the main modules of the system and displaying results.

The *instance launcher* auxiliary module starts instances of the pattern detection, control panel, and events generator modules. After that, it remains waiting for the arrival of command orders (*e.g.*, attend a new source of data, which causes that a new instance of recognition and tracking module is launched). The *control panel* module consist of a web service and a web interface that allow final users to start new processing instances and visualize partial and final results. The *event generator* module stays idle while waiting for results generated by the patterns detector. Generated results, when available, are sent to the event generator. Based on the results received, the event generator generates web events that are sent to all web users using the control panel.

5 Implementation

This section describes the main decisions about technologies and algorithms taken during the implementation of the system.

5.1 Technology selection

The search of technologies for implementing the system was based on a set of predefined conditions related to the main requirements of a pedestrian movement patterns detection system, including: *i*) using a cross-platform programming language; *ii*) develop over a programming language without technical complexities (not to be hardly typed, has an automatic memory handler, etc.) and having a broad and active community; *iii*) using libraries free of use and preferably open source; *iv*) achieving good performance on all tasks covered by the system: image processing, pattern detection, message passing and management, etc.

After a literature and technology research and based on the works by Mallick [17] and Coelho [18], a group of configurations were selected for a deeper study: Matlab, OpenCV over C/C++, and OpenCV over Python. Both OpenCV and Python are free and open source. In addition, Python is a dynamically typed language and counts with an automatic memory manager. Python has a wide variety of free and open source scientific libraries and the community is broad and active. Regarding performance, Python is also an efficient option. The study allowed to conclude that the best choice for implementing the system is using OpenCV library (version 3.0.0 was selected) over Python (version 3.4.3).

5.2 Communication between modules

The AMQP implementation from RabbitMQ (`www.rabbitmq.com`) is used for the communication between modules. RabbitMQ was thought to support parallelism and be robust for messages' management. For the connection between Python and the RabbirMQ service, the pika library was used.

In AMQP, *exchange* elements provide the message delivery service, according to instructions about how and where to send them. Exchanges are of four types: direct, topic, fanout, or header. All data in RabbitMQ is in JSON format, a standard, language independent, and simple format for data exchange.

An exchange of type direct was defined between recognition and tracking and pattern detection modules. Each instance of the recognition and tracking module generates messages that are addressed to a unique queue attended by an instance of the pattern detection module. Messages exchanged between the two main modules are of two types: *configuration*, used to attend the instance of recognition and tracking that sends the message; and *data*, which contains precise information about objects of interest.

The pattern detection module sends its results to an exchange of type topic. Each message contains a key that indicates the message type: commands, state information, and matched patterns warnings. The events generator module binds the exchange with a queue to receive the three types of messages, while the instance launcher module binds the exchange to receive just commands messages.

5.3 Recognition and tracking module

The main implementation details of the four stages of the recognition and tracking are described next.

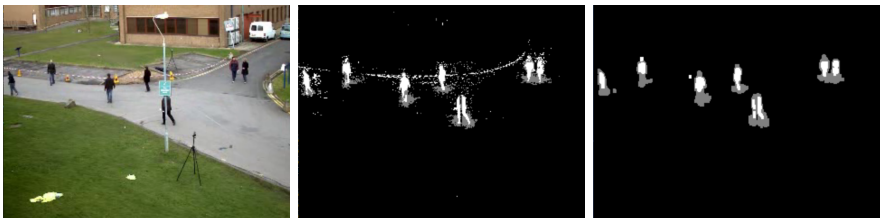
Background subtraction. Algorithm 1 presents the steps followed by the component in charge of performing background subtraction.

Algorithm 1 Background subtraction steps

```
1: frame ← raw image
2: grey image ← BGRToGrey(frame)
3: blurred image ← GaussianBlur(grey image)
4: binary image ← BackgroundSubtractor(blurred image)
5: binary image without noise ← MorphologicalOperations(binary image)
6: output ← binary image without noise
```

First, background subtraction transforms the raw image to an image in gray scale (line 3 in Algorithm 1). The grayscale image allows processing less information and results in a lower processing time. After that, the gray scale image is blurred (line 3). Blurring is a technique for reducing the noise presented in the image [19]. Blur operations are made by the application of filters. In the proposed system, a Gaussian filter is applied. A Gaussian filters filter applies a convolution in each point of the image using a Gaussian kernel and then returns the summation as the final result. The implementation of the Gaussian filter used in the system is included in the OpenCV library. After blurring the image, the background is subtracted (line 4). Two different methods were integrated to the system for this purpose: Improved Mixture of Gaussians (MOG2) and k-NN. Both methods are included in OpenCV and their use is indicated by a parameter in the configuration of each instance of the recognition and tracking module.

A binary image is obtained after background subtraction. In this image, some elements are detected incomplete or are too close to others, generating a not-desired union of blobs. To mitigate these problems, morphological operations (MO) are applied to study the shape and structure of elements (line 5). *Erosion* allows separating elements that appears together by small contact areas. *Dilatation* allows joining nearby elements by applying edge thickening. *Opening* consists in applying first erosion and then dilatation, while *closing* is the result of applying first dilatation and then erosion. The result obtained after applying MO is an image with less noise and better identified elements. A sample of the results of the processing, step by step, is presented in Fig. 3.



(a) Raw image (b) k-NN before MO (c) k-NN after MO

Fig. 3: Background subtraction steps

Blobs detection. The proposed system includes two methods for processing the binary images for detecting blobs: *simple blob detector* (SBD) and *blob detection based on bounding boxes* (BBBD). SBD is a basic implementation of a blob extractor provided by OpenCV [20] BBBD is a specific method implemented as part of the reported research. It operates in two phases: the first phase consist on detecting the contour of elements and the second phase performs a search of the minimum rectangles that contains the detected contours (the *bounding boxes*). Both methods return a set of rectangles that contains the blobs detected.

Blobs classification. Blobs classification takes the set of rectangles as input and classifies them into *useful blobs*, *i.e.*, those containing objects of interest, or as *not useful blobs* when not. Not useful blobs are discarded.

Three different techniques are implemented, which can be applied isolated or in combination with each other, to improve the results of the classification:

– *Aspect ratio* (AR) classifies blobs based on the relation (ratio) between their width and height. If the ratio is close to the average value of the objects of interest, AR indicates that the blob contains at least one object of interest. The major benefit of AR its low computational cost. However, it tends to be inaccurate because the reference aspect ratio often varies significantly for different data sources. AR is not useful for discarding blobs (*i.e.*, the fact that a blob fulfills the relation does not mean that it contains an object of interest) and wrongly discards blobs that does not comply with the established aspect ratio criterion due to they contain multiple objects of interest (*e.g.*, objects close enough one of each other that conforms a unique blob).

– *Computational intelligence* uses *default people detector*, a pre-trained learning algorithm included in OpenCV. Dalal and Triggs [21] demonstrated that a combination of Histograms of Oriented Gradients (HOG) for feature extraction, and Support Vector Machine (SVM) for the classification of the feature vectors, allows obtaining accurate detection results. The method is based on moving a gridded window all over the image, extracting the vectors of features (using HOG) and classifying them (using SVM) to decide if the image contains a person. Considering that the proposed system studies the movement of persons, the blob classification technique process just those areas where movement was detected. Thus, the default people detector algorithm is applied just over each detected blob, reducing the computational cost of the processing. This method returns a set of rectangles that contains persons, some of them overlapped. To reduce and unify the number of rectangles, the *Non-Maximum Suppression* algorithm [22] is used.
– *Aspect ratio frequency* filters blobs depending on the frequency that similar blobs were filtered by computational intelligence algorithms. In this way it is possible to simulate a behavior close to the computational intelligence algorithms without the need to execute them in each iteration.

Tracking. This stage determine the one-to-one correspondence between the detected objects of interest in the current and previous frames. A specific variant of the Hungarian algorithm [23] was developed for this purpose. The Hungarian algorithm receives as input a set of blobs, a set of objects of interest, and a cost function, and returns a correspondence between both input sets that optimizes the defined cost function. The original Hungarian algorithm only accepts inputs of the same size, thus the result is always surjective. A modified implementation was developed to allow the system to handle a different number of blobs than the number of objects of interest. This way, it is possible to process those cases where the number of blobs detected is lower than the objects of interest in the previous frame, or vice versa. In addition, the modified version declares invalid all correspondences whose cost is greater than a certain threshold, assuming that the blobs do not correspond to the objects in question.

The cost function used in the proposed system has three components, weighted according to specific parameters in the instance file configuration: i) the distance between the position of an object in the previous frame and the current position of the blob; ii) the distance between the predicted position of the object for the current frame and the current position of the blob; and iii) the difference between the colors of the blob that contained the object in the previous frame and the color of the blob in the current frame.

The position of a blob is not always accurately adjusted to the shape of the objects. As a consequence, the raw trace of an object can suffer zig-zag movements, making it difficult to track the object and detect movement patterns. Kalman filters [24] are applied to avoid the zig-zag effect and to predict the next probable position of each object. The Kalman filters method keeps the state of each object, updating it in each frame based on a prediction and correction model (considering position, speed and acceleration for each person).

Two structures were implemented to store information of different objects and their tracking, and to resolve occlusions: *tracklets*, associated to a unique object, to store and update the relevant tracking information (position, color, frame when it appears, last frame when its object was not occluded, etc.) and *groups*, used to store tracklets and associate blobs to frames. Due to occlusion, some groups may have many tracklets and one or more blobs associated.

Tracklets are updated or removed in each iteration of the tracking algorithm, depending on the groups they belong to, and both the time of permanence in the group and in the system. A tracklet can be removed from the system due to a ghost blob, resulting from noise in the cameras or in previous steps, due to low tracking confidence, not associated to a one-to-one group for a certain time, or because the object disappears from the scene.

Three levels are considered for tracklet information updating: i) *correction with maximum confidence*, when a tracklet is associated one-to-one to a group, the blob of the group represents the tracked object and the tracklet is updated with the information of position and appearance of the blob; ii) *correction with minimum confidence*, when an object suffers multiple occlusion for a certain time, the tracklet is not associated one-to-one to a group, the predicted position is no longer trustworthy and the tracklet is updated with the position of the blob that represents the occlusion; and iii) *prediction only*, when a tracklet was recently associated one-to-one to a group, it is assumed that the predicted position is reliable and no correction is made (*e.g.*, when objects are occluded by a short time or two paths cross each other); this level makes possible keep tracking positions of the objects even when there is no blob assigned in the current iteration.

5.4 Pattern detection module

The pattern detection module is capable of processing multiple source of data concurrently. The module consists of two stages:

- The first stage receives messages from multiple instances of the recognition and tracking module and routes them depending on the source identifier. Two types of messages exist: i) when processing requests by new instances of recognition and tracking arrive, the pattern detection module creates the structures to handle data from the new data source identified in the message, and configuration values in the message are applies to process data from the respective data source; ii) when data of detected objects arrive, messages are routed to the structures previously created to handle the data source.
- The second stage receives data of the detected objects and has the patterns definition, the recent history of primitives fulfilled by each detected object, and all the logic needed to check patterns compliance. Patterns are defined as a sequence of primitives, defined by a 'primitive type' (in the implemented system: `SPEED`, `DIRECTION`, `AGGLOMERATION`), an 'event type' for each type of primitive (*e.g.*, for the `SPEED` primitive, `WALKING`, `RUNNING` and `STOPPED` are possible), 'quantifier' defines how the values of the met primitives are

compared with the required by the pattern (`LE`–lesser or equal, `GE`–greater or equal, `AX`–approximate, `EQ`–equal and `NM`–irrelevant value).

6 Sample validation results

This section presents sample validation results of the proposed system.

6.1 Recognition and tracking module

The validation of the recognition and tracking module was performed using the video from scenario S2.L1 of the PETS09 dataset (fixed camera over people's head, at 7 FPS) [25]. During the 1:54 minutes of the video, 19 people get in and out of scene and walk around, generating multiple occlusions among them and with objects of the scene. A good performance of the module is characterized by an accurate tracking, processed and sent to the pattern detection module in real time (*i.e.*, in less than a second). Thus, the metrics used in the experimental analysis focus on the final result of the module and not in partial filter results.

The average and maximum processing time per frame are computed to evaluated efficiency. The MOTChallenge benchmark, an unified evaluation platform created by Leal-Taixé et al. [26], is used to evaluate the tracking accuracy. MOTChallenge consist of three components: i) a public dataset including own and well known videos (some of them with ground truth information, like PETS09-S2L1); ii) a centralized evaluation method that allows the comparison of results; and iii) an infrastructure that makes it possible the crowdsourcing of new data, new evaluation methods and new notations (*i.e.*, ground truth).

MOTChallenge provides several metrics. Multiple Object Tracking Accuracy (MOTA) is used to evaluate the tracking accuracy. MOTA is a percentage that combines three indicators: false positives, false negatives, and identity changes of the tracked persons. The greater the MOTA value is, the more accurate is the tracking of the persons. In addition, the average and maximum difference between the number of persons in each frame (from the ground truth) and the detected tracklets and blobs in each frame are evaluated.

The system has a set of configuration values that determine how accurate the module performs in a given scene. Thus, experiments were performed to find the best combination of configuration values. Since the module has a pipes and filters architecture, it is assumed that the performance of each filter depends only on its configuration values, so finding the best configuration values for each filter result in the best for the entire module. The 40 parameters were studied in an execution plan composed of four sub-plans (divided into 11 blocks). A total number of 1458 experiments were performed.

For each executed block, three configurations are selected to process the next block, taking into account the following three criteria: i) higher MOTA value, ii) lower average difference in the person counting, iii) from the ones with higher MOTA value, the one with lower average processing time per frame.

When compared with the (manual) configuration used during the development of the system, the three best configurations were able to improve the MOTA value 14.8% and the person counting 34%. In addition, the highest MOTA value obtained by the system (52,7) is higher than the average MOTA value (36,6) obtained by algorithms in the 2D MOT 2015 benchmark [27] for a set of images. The average processing time per frame is similar for all three configurations, between 0,02–0,05 seconds, being the blobs classification the filter that requires the most processing time. The maximum processing times per frame are in the range of 0,06–0,1 seconds. For all cases, the average processing time is lower than 0,05 seconds, which allows processing in real time a 20 FPS data source.

No differences were registered in the count of persons in 533 frames for the best configuration and in 433 frames for the worst configuration (from a total of 795 frames). As for the maximum difference in the counting, a difference of five in one configuration and four in the other two configurations was registered.

6.2 Pattern detection module

The validation of the pattern detection module was performed over a recorded video (2:51 minutes, resolution of 800×600 pixels, in natural light). In the video, nine persons walk around and get in and out of the scene occasionally.

Five events occur in the video, which can be detected by the four pre-loaded patterns in the system: two agglomerations, two street robberies and one 90-degree turn. The detection of the first street robbery is shown in Figure 4.



Fig. 4: Scene where the first street robbery occurs.

Experiments were oriented to evaluate the capability of the system to detect pre-defined patterns exactly, at the moment they occur. The closer to the start of the event it is detected, the more accurate the system is. In addition to the timing accuracy of event detection, the number of false positives and false negatives during the processing is taken into account. The accuracy of the detection of true positive cases is evaluated by the difference between the moment that an event is notified and the real starting time of the event. For false positives and false negatives, only the number of occurrences is taken into account.

Three of the five events were notified during the video processing: three true positives, two false negatives, and no false positive event notifications were recorded. True positives events were notified in a mean time of 8.3 seconds and a median of 4.0 seconds.

The first not reported event was the second street robbery. This event was not detected due to an incorrect resolution of an occlusion. The second not

reported event corresponded to a 90-degree turn. From the empirical evaluation, it was observed that the detection patterns module has a high sensitivity to small variations of consecutive positions of objects. The fact that the system detects a sequence of small turns instead of a single turn suggests that, in order to detect the event correctly, it is necessary to use a longer history of the last positions of the person who turns.

7 Conclusions and future work

This article presented a system for detecting pedestrian movement patterns, based on computational intelligence for image processing and pattern detection.

The proposed system is capable of processing in real time multiple image/video sources. An architecture based on pipes and filters is used to allow an easy evaluation of different computational intelligence techniques in each stage of the processing. Two main stages are identified in the system, focusing on extracting relevant features of the processed images (implemented in the recognition and tracking module) and detecting movement patterns (implemented in the pattern detection module). Several techniques are applied for image processing and pattern detection. The proposed implementation fulfills important requirements for a pedestrian movement patterns detection system: it is cross-platform, open source, and efficient.

The experimental analysis performed over more than 1450 problem instances covers the two main stages of the system. The system was evaluated using PETS09-S2L1 videos and the results were compared with part of the MOTChallenge benchmark results. Results suggest that the proposed system is competitive, yet simpler, than other similar software methods.

Further details about the proposed system are available on the project website `https://www.fing.edu.uy/inco/grupos/cecal/hpc/APMP`.

Acknowledgments

The research reported in this article was developed on the project 'Algoritmos de inteligencia computacional para detección de patrones de movimiento de personas' by J. Chavat, J. Gómez and I. Silveira (advisor: S. Nesmachnow). The work of S. Nesmachnow is partly supported by ANII and PEDECIBA, Uruguay.

References

1. Kruegle, H.: CCTV Surveillance, Second Edition: Video Practices and Technology. Butterworth-Heinemann, Butterworth-Heinemann, Newton, MA, USA (2006)
2. Gonzalez, R., Woods, R.: Digital image processing. Pearson Education (2008)
3. Ramírez, B.: Procesamiento Digital de Imágenes: Fundamentos de la Imagen Digital. Universidad Nacional Autónoma de México (2006), `http://verona.fi-p.unam.mx/boris/teachingnotes/Capitulo2.pdf`, [May 2018]

4. Jain, A., Duin, R., Mao, J.: Statistical pattern recognition: a review. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence **22**(1), 4–37 (2000)
5. Webb, A.: Statistical pattern recognition. John Wiley & Sons (2003)
6. Carrasco, J., Martínez, J.: Reconocimiento de patrones. Komputer Sapiens **2**(3), 5–9 (2011)
7. Valera, M., Velastin, S.: Intelligent distributed surveillance systems: a review. IEE Proceedings–Vision, Image and Signal Processing **152**(2), 192–204 (2005)
8. Piccardi, M.: Background subtraction techniques: a review. In: IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. pp. 3099–3104 (2004)
9. López, H.: Detección y seguimiento de objetos con cámaras en movimiento. Engineering Thesis, Universidad Autónoma de Madrid, Spain (2011)
10. Lefloch, D.: Real-time people counting system using video camera. M.Sc. Thesis, Université de Bourgogne, France (2007)
11. Rodriguez, M., Laptev, I., Sivic, J., Audibert, J.: Density-aware person detection and tracking in crowds. In: IEEE International Conference on Computer Vision. pp. 2423–2430 (2011)
12. Leach, M., Sparks, E., Robertson, N.: Contextual anomaly detection in crowded surveillance scenes. Pattern Recognition Letters **44**, 71–79 (2014)
13. Cho, S., Kang, H.: Abnormal behavior detection using hybrid agents in crowded scenes. Pattern Recognition Letters **44**, 64–70 (2014)
14. Zhu, X., Jin, X., Zhang, X., Li, C., He, F., Wang, L.: Context-aware local abnormality detection in crowded scene. Science China Information Sciences **58**(5), 1–11 (2015)
15. Buschmann, F., Meunier, R., Rohnert, H., Sommerlad, P., Stal, M.: Pattern-Oriented Software Architecture: A System of Patterns. Wiley Publishing (1996)
16. van Huis, J., Bouma, H., Baan, J., Burghouts, G., Eendebak, P., den Hollander, R., Dijk, J., van Rest, J.: Track-based event recognition in a realistic crowded environment. In: Proceedings of SPIE–The International Society for Optical Engineering. vol. 9253, p. 92530E (2014)
17. Mallick, S.: Learn OpenCV (C++ / Python). `http://www.learnopencv.com/` (2016), Last access 26-5-2018
18. Coelho, L.: Why Python is Better than Matlab for Scientific Software. `https://metarabbit.wordpress.com/2013/10/18/`, [May 2018]
19. Nixon, M., Aguado, A.: Feature Extraction and Image Processing. Academic Press (2008)
20. OpenCV Developers Team: OpenCV Simple Blob Detector. `https://docs.opencv.org/3.4/d0/d7a/classcv_1_1SimpleBlobDetector.html`, [May 2018]
21. Dalal, N., Triggs, B.: Histograms of oriented gradients for human detection. In: IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. pp. 886–893 (2005)
22. Rosebrock, A.: Non-Maximum Suppression for Object Detection in Python. `http://www.pyimagesearch.com/2014/11/17` (2014), Last access 26-5-2018
23. Kuhn, H.: The Hungarian method for the assignment problem. Naval research logistics quarterly **2**(1-2), 83–97 (1955)
24. Kalman, R.: A new approach to linear filtering and prediction problems. Journal of basic Engineering **82**(1), 35–45 (1960)
25. University of Reading: Performance Evaluation of Tracking and Surveillance. `http://www.cvg.reading.ac.uk/PETS2009`, [May 2018]
26. Leal-Taixé, L., Milan, A., Reid, I., Roth, S., Schindler, K.: MOTChallenge: Multiple Object Tracking Benchmark. `https://motchallenge.net/`, [May 2018]
27. Leal-Taixé, L., Milan, A., Reid, I., Roth, S., Schindler, K.: MOTChallenge results 2D. `https://motchallenge.net/results/2D_MOT_2015/`, [May 2018]

An IoT Group-Based Protocol for Smart City Interconnection

Jaime Lloret[1], Sandra Sendra[1,2], Pedro Luis González[3] and Lorena Parra[1]

[1] Instituto de Investigación para la Gestión Integrada de zonas Costeras, Universitat Politècnica de València, Carretera Nazaret-Oliva, s/n 46730 Grao de Gandia, Valencia, Spain.
[2] Departamento de Teoría de la Señal, Telemática y Comunicaciones (TSTC), Universidad de Granada. Calle Periodista Daniel Saucedo Aranda, s/n, 18071 Granada, Spain
[3] Departamento de electrónica, Universidad Central, Cra 5 No. 21-38, Bogotá, Colombia
jlloret@dcom.upv.es, ssendra@ugr.es,
pgonzalezr1@ucentral.edu.co,loparbo@doctor.upv.es

Abstract. The evolution of the information and communication technologies (ICT) and the need to solve and improve some services in large cities such as environmental monitoring, health, traffic, etc. Day by day, new sensors capable of taking parameters of the environment are developed. These sensors must be integrated into larger networks and, in turn, these networks must be integrated into a bigger network so that these sensors together can improve the efficiency and sustainability of cities. These cities equipped with sensors are known as Smart cities. This paper presents an architecture and communication protocol for interconnecting all these sensors and networks. The proposal is based on a group-based architecture able to connect the different infrastructures that provide services to the smart cities. The proposed system is scalable and fault-tolerant. The paper also provides the mathematical model for this interconnection system. Finally, the system is simulated in different topologies to see its operation and performance. The results show that, although the size of network increases, the amount of generated traffic remains quite stable.

Keywords: Smart City, Internet of Things (IoT), Protocols, Group- based Topology, sustainability, Wireless Sensor Networks (WSNs).

1 Introduction

The paradigm of the Internet of Things (IoT) is a new concept based on the interconnection of objects of everyday life which surround us. These devices are composed by digital systems, microcontrollers, sensors and a communications interface that will allow them to communicate with each other and with the users, being integral elements of the Internet [1]. Therefore, IoT tries to extend the networks and the Internet to give access to devices such as appliances, surveillance cameras, monitoring sensors, actuators, screens, vehicles, etc. IoT networks and wireless sensor networks currently serve a wide range of applications such as home automation, industrial processes, medicine, remote healthcare, Ambient Assisted Living (AAL) [2], intelligent energy resource management, automotive, waste management traffic

and many others [3]. Each one of these applications can be understood as an improvement tool in the current cities. This is known as Smart Cities.

A Smart City [4] can be understood as a complex scenario composed by networks and heterogeneous technologies that generate a huge amount and variety of data with the aim of improving the welfare of its inhabitants and providing new services to citizens, businesses and public administrations. There are many application areas where new technologies are applied in a Smart City [5]. The most current ones are:

- Environment
- Education
- Mobility and Traffic
- Economy
- Government
- Security
- Health
- Tourism
- Industry
- Home

The implementation of Smart City and ICT solutions such as Big Data and IoT promotes a new way of understanding the relationships of citizens and their urban environment and promotes benefits such as the optimization of the resources allocation and the integration of processes in our environment. In smart cities, the quality of life of its citizens increases. A Smart City is designed to improve the quality of public services that become more efficient. The smart city reduces CO_2 emissions and reduces the impact on the environment. Therefore, it reduces the problems that the greenhouse effect is causing in today's society.

One of the most important factors for the development of the Smart City is the correct interconnection and the design of the architecture that unites the different infrastructures [6]. There are different architectures and network protocols that can be easily adapted to this type of networks. However, many of them do not provide the efficiency we require when large amounts of data are sent. One of the most interesting architectural proposals is the group-based networks [7]. There are several architectures and protocols usually used for WSN that could be used for connecting Smart Cities. However, group-based topologies and networks improve the performance and the efficiency of the whole network [8]. Group-based topologies permit a more flexible and efficient sensors operation. This also implies lower energy consumption than regular network topologies, which implies an increase of the network lifetime [9].

Up to now, this kind of topologies has been implemented in WSNs but we want to apply them to the smart cities interconnection. So, in this paper, we propose the use of group based topologies for connecting the different services and subnets that monitor some environmental parameters. We will present the scenario where our proposal can be applied and the architecture design. Finally, the architecture will be simulated to see its operation.

This paper is structured as follows. Section 2 discusses some interesting works related to this proposal. Section 3 describes the proposed scenario and the interconnection system. Section 4 explains the architecture design and data

management. Section 5 describes the mathematical model and the simulation results. Finally, in Section 6 presents the conclusion and future work.

2 Related Work

This section presents some interesting works related to proposed architectures to smart cities and interesting ideas of group-based topology proposals. It is important to know that group-based topologies currently have several applications such as the energy sensing in smart grids [10], although its initial goal was the energy saving in complex topologies [11].

There are several approaches that try to explain how the Smart city architecture is deployed. For example, Gaur et al. [12] proposed a multi-level Smart City architecture based on semantic web technologies and Dempster-Shafer uncertainty theory and explained its functionality and some real-time context-aware scenarios

Mitton et al. [13] presented a hierarchical organization for smart cities that permits to separately manage a high-level intelligence, achieving the abstraction of data developed according to the Sensor Web Enablement (SWE) standard. The solution is implemented using Contiki, an operating system especially designed for sensors. The results shows this solution overcomes the limitations of SWE and gives the possibility of developing a platform for communicating heterogeneous sensors networks as the ones we could find in Smart cities.

Regarding to group-based topologies, in [7], Lloret et al. presented a group-based grid architecture using an efficient neighbor node selection. This architecture organizes logical connections between nodes from different groups of nodes allowing sharing resources, data or computing time between groups. Connections are used to find and share available resources from other groups and they are established based on node's available capacity. Suitable nodes have higher roles in the architecture and their function is to organize connections based on a node selection process. Nodes' logical connections topology changes depending on some dynamic parameters.

For example, Garcia et al. [8] showed how the organization of sensors in cooperative groups can reduce the global energy consumption of the WSN. Also, it is show that a cooperative network based on groups reduces the number of messages transmitted within the WSN, which implies a reduction in the energy consumed throughout the network, and, consequently, an increase in the life of the network.

Lloret et al. [14] presented in this work the design and simulation of a cluster-based architecture to structure topologies of WSNs to exchange information, data and services between all interconnected clusters. The results showed this protocol is scalable, secure and fault tolerant and it easily allows the joining of new clusters.

As far as we know, there are no similar proposals of protocols specially designed to interconnect small infrastructures in smart cities. For this reason, this paper presents an efficient protocol for Smart City Interconnection.

3 Proposed Scenario and Interconnection System Components

This section presents the network architecture and its operation as well as the different elements and nodes that compose the network.

3.1 Scenario Description

In the Smart City of this proposal, the protocol allows an intelligent communication between each IoT network, if each central node of the network (IoT Gateway) is intelligent and is also connected to an intelligent manager in the cloud (IoT Platform) through the Internet.

Each Intelligent IoT Network (Smart Home, Smart Grid, Smart Health, Smart Factory) has a multiprotocol Gateway that allows managing and centralizing all information regardless of the underlying technology of interconnection (see Fig. 1). Each Thing connected within the network performs an exchange of requests and messages by protocol messages. These messages were written by an artificial intelligence (AI) algorithm in the Gateway. It uses tags for its type of parameter and, then, forwards them to the Destination Things within the network (WLAN) or by the local network through the Internet. In the cloud, an IoT platform is divided into sections with an identifier (Id) for each network connection converted into an interface that receives and classifies the information according to the types of parameters and processes them then by artificial intelligence to share them and redistribute them in the other networks.

The platforms that are in the cloud, are vertically stacked as layers according to the type of service and is organized horizontally in interfaces according to the type of parameters, to give greater flow to the information and more processing capacity to the AI.

The operating philosophy of this protocol is based on two main functions; Monitoring things and the exchange of "requests" through different types of messages. The requests are processed by the AI, depending on the type of relationship established (M2M, P2M, M2P). That is, it is not just a remote control over Things; but the things are also decided from the received request, if it activates or not the function that is required.

The data sent from the Things are organized in the platform by the AI in groups of parameters common to the IoT networks that are linked to the cloud. For example, if the group of parameters to be processed corresponds to an energy saving and consumption system, the service layer could be reinjected to the power grid, which is common for all intelligent networks.

In this way, the messages issued by the Gateway of each network, would add a header with information regarding the type of parameter to the package and the AI would be responsible for deciding which service it belongs to and would also add it in the header. The body of the message would take the data processed by each protocol depending on its destination. In this sense, the function of the protocol is more relevant when the communication is established between the IoT Gateway AI and the IoT platform AI in the cloud.

In each intelligent network that will make up the smart city, things are connected to each other with different technologies depending on their use, bandwidth, and

processing capacity and distance (see Fig. 2). Therefore, the IoT Gateway has some of these technologies including Bluetooth 5 low cost (BLE 5.0) multiprotocol that allows the connection in mesh topology between technologies and protocols Thread, ZigBee, 6LowPAN and Wireless HART. The vast majority of interconnection protocols and technologies are compatible up to layer three of the vast majority of IoT architectures, which means that the work of the Gateway is based on establishing the type of relationship (M2M, P2M) and a common language between these technologies. This process is performed in the adaptation layer of the protocol between layers three and four.

The data originated by the Things are sent over protocols such as CoAP, MQTT, HTTP through any of the interconnection technologies and the Gateway manages them and forwards them using the AI. This will decide whether the packets are forwarded within the same network or outside the network based on the relationship, the resolution of a problem and a clear reason for the requests to be sent out of the network.

As we can observe in Fig. 3, once the data is sent out of the network, they travel on the protocol making use of another type of message where the information that will be served by the IoT platform in the cloud is packaged. Within the cloud, the AI algorithm is more complex and requires more resources to operate and manage the databases and permissions to give the necessary security to the entire system.

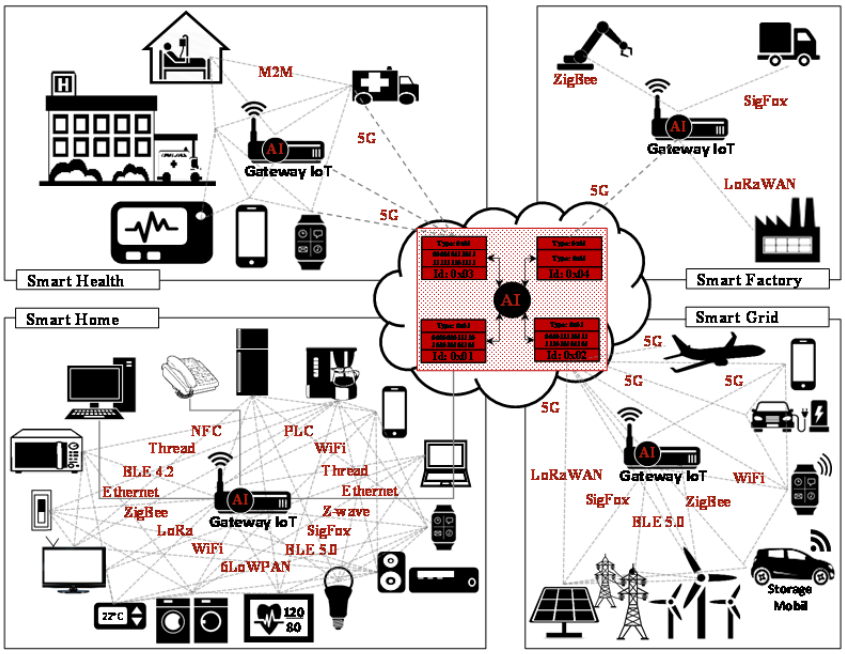


Fig. 1. Heterogeneous network of a Smart City

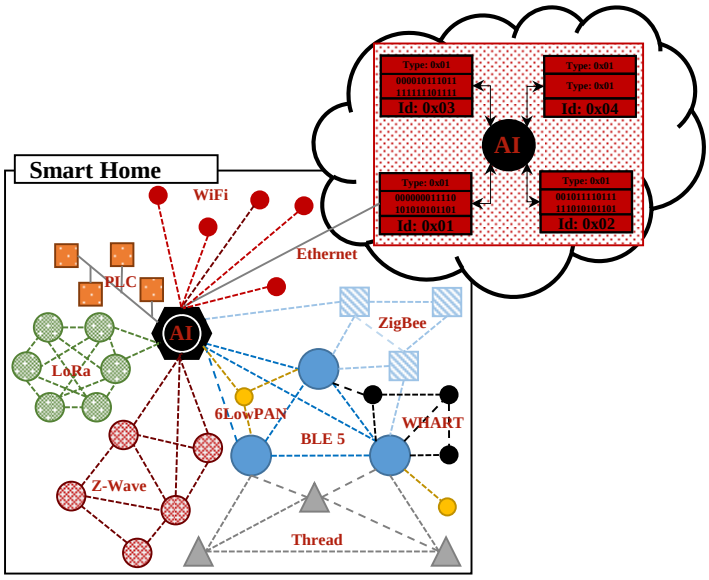


Fig. 2. Technologies used in smart home environments

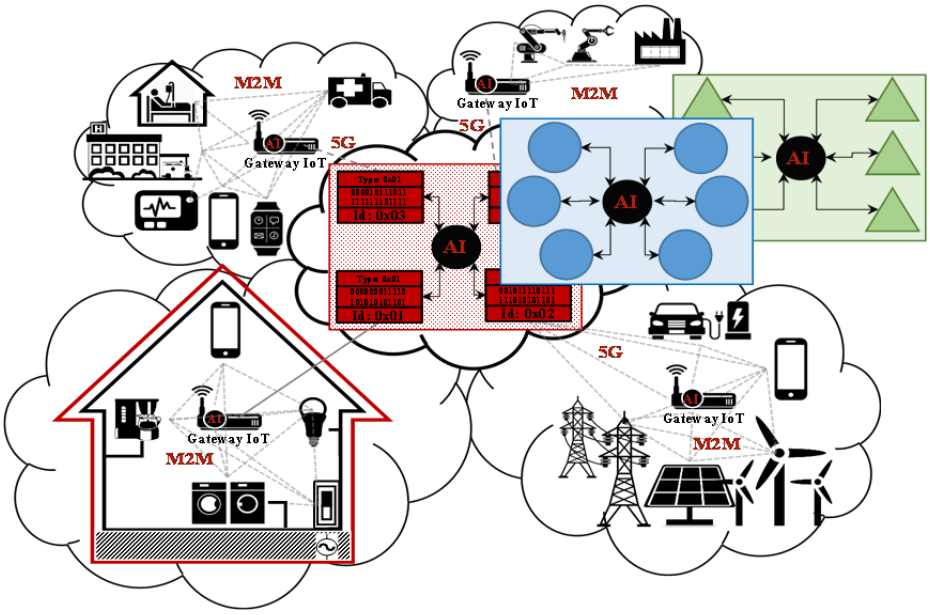


Fig. 3. Network integration of monitoring networks in a smart city.

3.2 Interconnection System Components

As we mentioned before, the IoT Group-Based topology is composed by small networks (subnet) focused on monitoring a determined application.

As Fig. 4 shows, our proposed topology for Smart City is based on two-layer architecture, i.e., the distribution layer and the access layer. Each subnet in charge of measuring some parameters, which is part of the smart city, has a fixed node (FG) and a backup fixed node (BFG) belong to the distribution layer. Additional nodes are called aggregated nodes (AG). These types of nodes are called gateway nodes.

In an established network, some FG nodes are known. When a new FG node joins a new network, it should be identified and authenticated with one or several FG nodes of other networks. However, a new AG node will be authenticated with the FG node of its own network. During the identification and authentication process, two tables (the access table and the distribution table) that contain the list of gateway nodes are created.

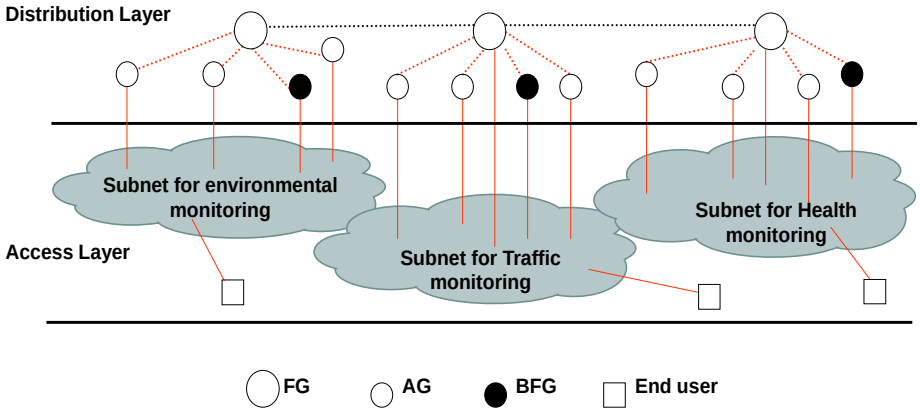


Fig. 4. Architecture of access layer and distribution layer

When a new gateway arrives to the network, it will serve as a support element in the distribution layer. BFG nodes are also considered as an AG node. However, it will be the FG node's designated successor. So, it should keep the information as an AG and the same information of the FG node. It will act as a backup node.

When a FG node fails, BFG becomes the FG node but a new BFG node should be designed. The BFG node designation is taken by the FG node as a function of available connections and the network load that the AG node is able to support. Finally, the BFG node will be considered as an AG node. On the one hand, AG nodes should learn, through the FG nodes connections in the subnet, the kind of data that has its subnet, the volume of data generated and the required resources this subnet could request. On the other hand, FG nodes are used for maintaining and managing the Smart City network interconnection. The FG nodes help to establish adjacencies between AG nodes which are used for forwarding data between the subnets that compose the access layer.

To create and maintain the distribution layer, there are two types of tables. Every gateway should maintain two tables:

(i) The access table is used by all gateways in the same subnet for communicating tasks. The FG node and all AG nodes in the same subnet form the access table. Each FG node maintains a unique access table.

(ii) There are two types of distribution tables. The FG nodes' distribution table is used to interconnect the FG nodes and interconnect AG nodes of different subnets.

Finally, the AG nodes' distribution table is used to forward the data from the end users of subnets to other AG nodes.

4 Protocol Design and Data Management

This section presents the proposed protocol and how the different elements manage the transmitted data.

As we can see in Fig. 5, the FG nodes are connected to other FG nodes from other subnet (black point lines) while the AG nodes are connected with FG of its own subnet (red point lines). At the same time, the AG nodes are connected to the selected AG nodes of the other subnets through solid black lines. Finally, there could be more AG nodes in the same subnet and they should be connected with the same AG node of the other subnet.

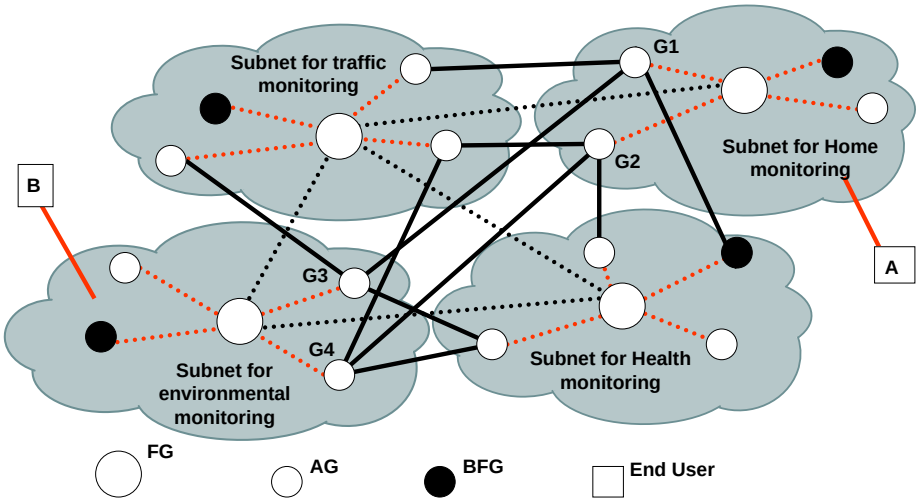


Fig. 5. Example of four subnets connected by the proposed Smart City interconnection

When a new FG node joins the network, it can randomly establish the first connection with any FG node in this network. A FG node will try to become adjacent to at least one other FG node previously known. When FG nodes advertise their information with other FG nodes, they reply with what is lacking in their distribution tables. This process allows FG nodes to share routing information with adjacent nodes and to build its distribution databases. Independently, each FG node runs the Shortest Path First (SPF) algorithm [15] on the distribution database then to determine the best routes to a destination. The SPF algorithm adds up the cost, which is a value based on

the hops to the destination, the available number of simultaneous supported connections by the FG nodes involved in that path, to other FG nodes, and the available load of the FG nodes involved in that path. It also sends an identifier of its own subnet and what kind of data its subnet will be send, without affecting on the cost value. The FG node, then, chooses the lowest cost path to add to its distribution table. If there are multiple paths to a destination, the lowest cost path is preferred.

When an end user sends a query, it is initially sent to its own subnet. If no result can be found, the search is sent to its network gateway (the AG node). The AG node looks up its distribution table and sends the search to the other AG nodes in its distribution table. It also looks up the type of multimedia file that can be searched (some networks allow audio searches only). That minimizes the waste of resources and bandwidth. Every AG node, receiving that query, sends the search to its subnet and will receive results. These results will be sent to the source AG node with an identifier of its network. The identifier will be used to find the associated metric. Finally, the results will be sent to the end user that had requested it. As a result of this query, the end user will receive the collected data by the sensor node and the subnet identifier. Finally, AG nodes can be static, learned by other end users or learned by the servers or the super-end users in the subnet.

5 Architecture Analysis and Simulations

This section shows the simulation results of our proposed IoT Group-Based Protocol and it operation in a Smart City.

5.1 Simulation setup

In order to model the system, we have considered several topologies with different nodes connections. We measure the number of queries and replies performed by a node as a function of the elapsed time. The nodes are divided into two levels, i.e., the FG nodes level and the AG nodes level. The behavior of both is modeled by means of number of queries and replies and time wasted.

To check our model, we consider no processing delays and the same bandwidth for all nodes. So all propagations are done in t_p.

When a new FG node joins the network, the network should converge. The convergence time should be the elapsed time that FG/AG nodes need to update their distribution table. This time is also determined by the diameter of the network.

Assuming that our network has m FG nodes, when the new FG node requests the entry to the FG level, the convergence time will be calculated by Eq. 1. If a topology like a line is considered, the total convergence time will be modeled by Eq 2:

$$T_t = d \cdot t_p \quad (1)$$

$$T_t = (m-1) \cdot t_p \quad (2)$$

Where d is the number of hops from the first to the last FG node.

At the AG nodes level, every new AG node must send a query to its FG node. This query generates m queries to other FG nodes. Those m queries will generate m replies to the first FG node and these m replies will be forwarded to the AG node. Finally, the AG node will send the m queries to the elected AG nodes of other networks and this fact will create *m* responses. In this case, the convergence will be modelled by Eq. 3:

$$T_s = (4 + 2 \cdot d) \cdot t_p \quad (3)$$

Where *d* is the number of hops from the first to the last FG node.

5.2 Simulation Results

In order to show how our protocol works, we have used four different topologies with different configurations where the number of connections, the degree of the nodes and the diameter of the topology values are varied to take measurements. The degree of the nodes is fixed in 56. It can be controlled by software when a new FG joins the system. The networks converge in $t_p = 0$. Each graph allows knowing the convergence of the interconnection system at FG nodes level how many are generated by an AG node the first time it joins the interconnection system.

Fig. 6 shows the first topology. It is composed by 56 nodes, 2 neighbor nodes per node and the network diameter is 28.

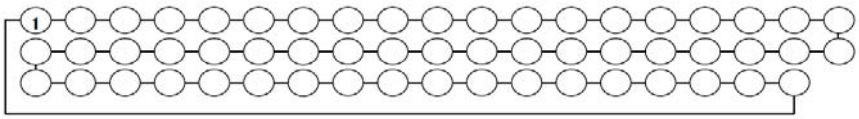


Fig. 6. Topology 1

Fig. 7 shows the number of packets generated by Topology 1 and measured at the third AG node.

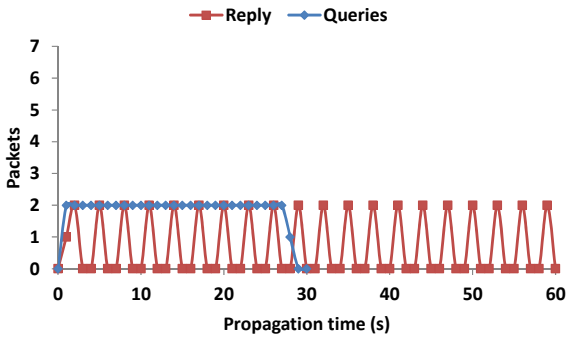


Fig. 7. Results of packets generated by Topology 1 and measured at the third AG node.

Fig. 8 shows the second topology. It is composed by 84 nodes, 3 neighbor nodes per node and the network diameter is 15.

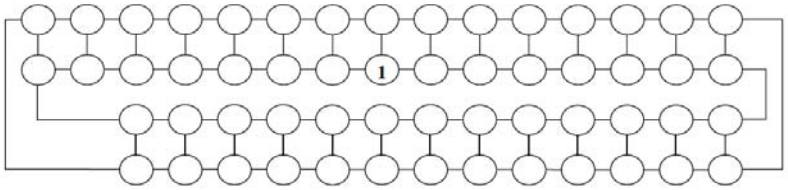


Fig. 8. Topology 2

Fig. 9 shows the number of packets generated by Topology 2 and measured at the third AG node.

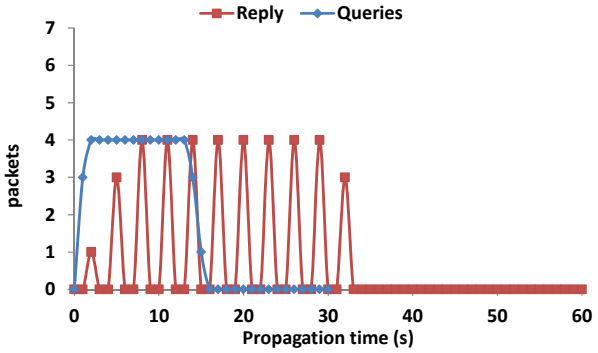


Fig. 9. Results of packets generated by Topology 2 and measured at the third AG node.

Fig. 10 shows the third topology. It is composed by 112 nodes, 4 neighbor nodes per node and the network diameter is 10.

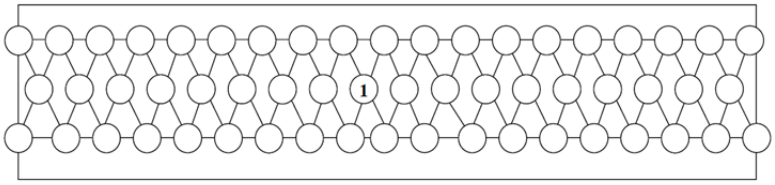


Fig. 10. Topology 3

Fig. 11 shows the number of packets generated by Topology 3 and measured at the third AG node.

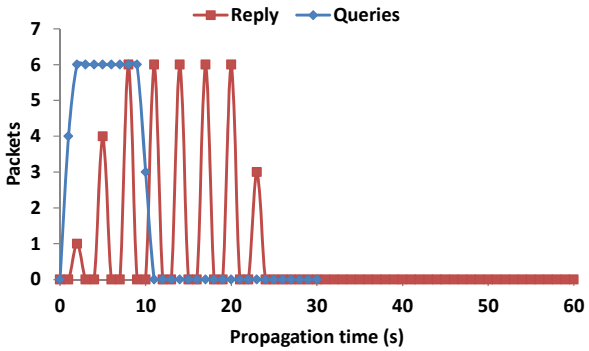


Fig. 11. Results of packets generated by Topology 3 and measured at the third AG node.

Fig. 12 shows the fourth topology. It is composed by 140 nodes, 5 neighbor nodes per node and the network diameter is 10.

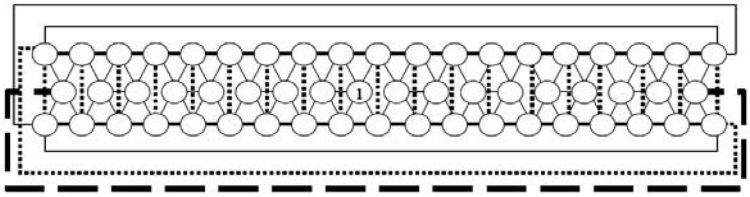


Fig. 12. Topology 4

Fig. 13 shows the number of packets generated by Topology 3 and measured at the third AG node.

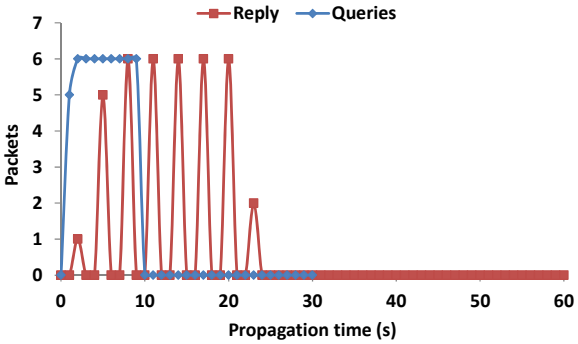


Fig. 13. Results of packets generated by Topology 4 and measured at the third AG node.

As results show, when the network is small and the nodes have few neighboring nodes, a large number of queries are generated. Consequently, the network generates a large number of replies (See Fig. 7). However, when the number of nodes and the number of neighbors is high (See Fig. 12), the network initially generates a high number of queries but, due to the composition of the group-based topology and our

protocol, the amount of replies generated is much lower (See Fig. 13). The results show that the proposed protocol and architecture is easily scalable showing a low network load.

6 Conclusion and Future Work

The integration of different technologies, protocols and architectures through a centralized management in a Gateway or at the platform level in the cloud, are complex to manage, due to the large amount of information generated by all interconnected devices. These devices compose complex networks known as IoT solutions. So, the use of decision methods through artificial intelligence (AI) algorithms becomes evident.

Most of these things are programmable and have the ability to connect to the Internet, which means the possibility of integrating artificial intelligence algorithms into their systems making them smart, this makes the communication between Things, Gateway and Platform even more efficient, because all would be controlled by the AI. The AI would avoid making use of the main Internet connection channel, if it first evaluates and decides that Things (M2M) can solve a problem locally.

To interconnect all these systems is needed to develop architectures and protocols specially designed to this kind of applications and services. The group-based topologies are energy efficient and reduce the network load. So, the scalability of WSNs in Smart Cities is guaranteed.

As future work, we would like to implement this proposal in a real scenario and compare these results with the simulated ones. We will study the possibility of extending this proposal to scenarios with mobile nodes [16]. In addition, we want to implement secure systems to ensure the data privacy [17] and analyze the possibility of extending the proposed to Next Generation Wireless Networks [18] and cognitive networks [19].

References

1. Atzori, L., Iera, A., Morabito, G. The internet of things: A survey. Computer networks, 54(15),2787-2805, (2010).
2. Lloret, J., Canovas, A., Sendra, S., Parra, L. A smart communication architecture for ambient assisted living. IEEE Commununication Magazine, 53(1), 26-33, (2015)
3. Bellavista, P., Cardone, G., Corradi, A., Foschini, L. Convergence of MANET and WSN in IoT urban scenarios. IEEE Sensors Journal, 13(10), 3558-3567, (2013)
4. Schaffers H., Komninos N., Pallot M., Trousse B., Nilsson M., Oliveira A. Smart Cities and the Future Internet: Towards Cooperation Frameworks for Open Innovation. In: Domingue J. et al. (eds) The future internet assembly (FIA 2011). Lecture Notes in Computer Science, vol 6656. Springer, Berlin, Heidelberg. (2011)
5. Zanella, A., Bui, N., Castellani, A., Vangelista, L., Zorzi, M. Internet of things for smart cities. IEEE Internet of Things journal, 1(1), 22-32, 2014.
6. Gaur, A., Scotney, B., Parr, G., McClean, S. . Smart city architecture and its applications based on IoT. Procedia computer science, 52(), 1089-1094, (2015)

7. Lloret, J., Garcia, M., Tomas, J., Sendra, S. A group-based architecture for grids. Telecommunication Systems, 46(2), 117-133, (2011)
8. Garcia, M., Sendra, S., Lloret, J., Canovas, A. Saving energy and improving communications using cooperative group-based wireless sensor networks. Telecommunication Systems, 52(4), 2489-2502, (2013)
9. Azizi, R. Consumption of energy and routing protocols in wireless sensor network. Network Protocols and Algorithms, 8(3), 76-87, (2016)
10. Babakmehr, M., Simões, M. G., Wakin, M. B., & Harirchi, F. Compressive sensing-based topology identification for smart grids. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 12(2), 532-543, (2016)
11. Zebbane, B., Chenait, M., Badache, N. A group-based energy-saving algorithm for sleep/wake scheduling and topology control in wireless sensor networks. Wireless Personal Communications, 84(2), 959-983, (2015).
12. Al-Hader, M., Rodzi, A., Sharif, A. R., Ahmad, N. . Smart city components architicture. In International Conference on Computational Intelligence, Modelling and Simulation, 2009. (CSSim'09).7-9 Sept. 2009, Brno, Czech Republic. (pp. 93-97).
13. Mitton, N., Papavassiliou, S., Puliafito, A., Trivedi, K. S. Combining Cloud and sensors in a smart city environment, Journal of Wireless Communication Network (2012) 2012: 247.
14. Lloret, J., Garcia, M., Bri, D., Diaz, JR., A cluster-based architecture to structure he topologu of parallel wireless sensor, Sensors, 9(12), 10513-10544, (2009).
15. Cormen, T. H.; Leiserson C. E.; Rivest R. L. Introduction to Algorithms. (1990) MIT Press. ISBN 0-262-03141-8
16. Liu, C. M., Lai, C. C. A group-based data-driven approach for data synchronization in unstructured mobile P2P systems. Wireless Networks, 24(7), 2465–2482, (2018).
17. Sánchez, J., Corral, G., de Pozuelo, R. M., Zaballos, A. Security issues and threats that may affect the hybrid cloud of FINESCE. Network Protocols and Algorithms, 8(1), 26-57, (2016)
18. Ali, Khitem Ben, et al. Enhanced IEEE 802.21 Handover Design for QoS Support in Next Generation Wireless Networks. Adhoc & Sensor Wireless Networks, 34(1-4), 221-243 (2016).
19. Wang, Y., Song, M., Wei, Y. Complex Network Evolving Model with Preference and Anti-Preference for Cognitive Radio Ad Hoc Networks. Adhoc & Sensor Wireless Networks, 34(), 99-128 (2016)

Waste Generation Prediction in Smart Cities through Deep Neuroevolution

Andrés Camero, Jamal Toutouh, Javier Ferrer, and Enrique Alba

Universidad de Málaga, Málaga, España
Departamento de Lenguajes y Ciencias de la Computación,
andrescamero@uma.es,{jamal,ferrer,eat}@lcc.uma.es

Abstract. Managing the waste collection service is a challenge in the fast-growing city context. A key to success in planning the collection is having an accurate prediction of the filling level of the waste containers. In this study we present a solution to the waste generation prediction problem based on recurrent neural networks. Particularly, we introduce a deep neuroevolutionary technique to automatically design a deep network that encapsulates the behavior of all the waste containers in a city. We analyze a real world case study consisting of one year of filling level values of 217 containers located in a city in the south of Spain and compare our results to the state-of-the-art. The results show that the predictions of our approach exceeds all its competitors and that its accuracy is a key enabler for an appropriate waste collection planning.

Keywords: deep neuroevolution, deep learning, evolutionary algorithms, smart cities, waste collection

1 Introduction

The World's population is moving from rural to urban areas and it is expected that this trend will continue. The number of inhabitants in cities will be about 75% of the World's population by 2050 [1]. The fast demographic growth, together with the concentration of the population in cities and the increasing amount of daily waste are factors that push to the limit the ability of waste assimilation by Nature. This fact has forced the authorities to examine the cost-effectiveness and environmental impact of our economic system.

The linear structure of our economy has reached its limits and the natural resources of our planet are drained. Thus, a more sustainable model of economy is needed. For example, the *circular economy* [2, 3], which consists in the transformation of our waste into raw materials, proposing a new paradigm for a more sustainable future.

The unsustainable development of countries has created a problem due to the unstoppable waste generation. In addition, there are hardly any technological means to make an optimal management of the waste collection process. Nowadays, the solid waste collection is carried out without a previous analysis

of the demand, i.e. following a manually defined route. This approach has severe limitations, one of the most important is the variability in the amount of waste that needs to be picked up. This is especially critic in the case of selective collection (plastic, paper, glass,...), where the waste volume is smaller than in the organic case. Thus, when dealing with recyclable waste, the planning of the optimal collection routes is even more influential.

An alternative to tackle the planning of the collection routes is to determine which containers should be collected. Note that the recyclable waste collection process represents 70% of the operational cost in waste treatment [4]. Thus a reduction in the number of unnecessary visits to semi-empty containers will save money! Therefore, we aim to provide an alternative to predict if a waste container should be collected or not. Particularly, we propose to predict the filling level of the waste containers (all the containers involved in the operation at once) using a Recurrent Neural Network (RNN).

RNNs are top-notch at predicting time series, however as all Deep Learning (DL) techniques the selection of an appropriate network design is a tough task [5]. The use of automatic intelligent tools seems a mandatory requirement when addressing the design of RNNs, since the vast possible RNN architectures that can be generated defines a huge search space. In this sense, metaheuristics [6] emerged as efficient stochastic techniques able to address hard-to-solve optimization problems. Indeed, these algorithms are currently employed in a multitude of real world problems, e.g., in the domain of Smart City [7–11], showing a successful performance. Nevertheless, the use of such a methodology in the domain of DL is still limited [12].

In this article, we propose a hyper-parameter technique based on evolutionary computation and use it to design and train an RNN that predicts the filling level of the containers of a whole city. We test our approach using a real-world case study, presented by Ferrer and Alba [13], and benchmark our results against the results presented in the referred study. Therefore, the main contributions of this study are two:

- We define a deep neuroevolutionary technique to automatically design an efficient RNN.
- We use our proposal to design and train an RNN that predicts the filling level of the waste containers of a real city and benchmark our results against the state-of-the-art.

The remainder of this paper is organized as follows. The next section briefly reviews the state-of-the-art of smart waste management. Section 3 discusses about the use of DL to predict the waste generation rate. Section 4 presents a deep neuroevolutionary approach to design an artificial neural network-based predictor of the filling level of the waste containers. Section 5 presents the experiments carried out, results, benchmark, and analyses. Finally, Section 6 outlines our conclusions and proposes the future work.

2 Smart Waste Management

The waste collection is a process with uncountable variants and constraints which have led to a multitude of studies in recent years due to its importance. The works in the literature could be classified, among other ways, according to the waste type that is treated: *residential waste* commonly known as garbage [14, 10], *industrial waste* where customers are more dispersed and the amount of waste is higher [15], *recyclable waste* [16] increasingly important for our society, where the collection frequency is lower than organic waste and *hazardous waste* where the probability of damage is minimized [17].

In the municipal solid waste collection [18], the authorities need global studies to quantify the waste generated in a period of time to be able to manage them. Particularly, the waste generation forecasting for Xiamen city (China) inhabitants was studied by [19]. The main difference with our approach is the granularity of the object under study. They predict the amount of waste produced by the whole city, in contrast, we predict every single container in a city (i.e. a disaggregated prediction of the whole city). This supposes a considerable increase of the complexity of the problem that is solved, because it is necessary to consider multiple aspects such as the location, the customs of the citizens, the population density of the area, etc. In the same research line, the impact of the intervention of local authorities on waste collection has also been studied [20], being this relevant in the medium-long term.

Regarding the location where the collection takes place, there exist multiple variants of the problem. There are *communal collections* where the local authority identifies a place shared by the community [11, 21], in most cases a local waste facility for recycling. In the other side we found the *kerbside collection* [22] where the household waste is collected from individual small containers located near each house. The intermediate case studied here is the analysis of containers that give service to several streets and blocks of flats [23].

In previous works [24, 13] the authors used machine learning techniques to predict the filling level of a container. Particularly, the authors used Linear Regression, Gaussian Processes and Support Vector Machines for regression to predict each container individually. In this work we present a unique RNN able to generate predictions for the whole set of containers instead of creating and training individual predictors for each container.

3 Deep Learning for Waste Generation Prediction

In this study, we focus on waste generation prediction by applying DL based on specific type of artificial neural networks (ANN), RNN. As other ANNs, this type of networks are composed of multiple hidden layers between input and output layers. RNNs incorporate feedforward and feedback connections between layers to capture long-term dependency in an input. Thus, RNNs have successfully applied to address learning applications which involve sequential modeling and prediction as natural language, image, and speech recognition and modeling [25].

In turn, they have been applied in Smart Cities problems that require time dependent prediction [12].

We apply supervised learning, which consists in an iterative process that requires a training data set (N input-output pairs). As this study deals with the prediction of the filling levels, the inputs are the current filling level each container and the outputs are the next (future) filling levels. Thus, for each input, the ANN produces an output (i.e., a tentative future filling rate) which is compared to the expected output by using an error (cost or distance) function. Then, a procedure is applied to reduce this error by updating the network until a given stop criteria is reached [26].

Minimizing such learning error is a tough task. Backpropagation [27] (BP), a first-order gradient descent algorithm, is the most widely used method to address such issue. In order to apply BP on RNN, the network has to be unfold [28], i.e., the network is copied and connected in series a finite number of times (known as look back) to build an unrolled version of the RNN.

Large ANNs (as unfolded RNNs) suffer from overfitting to the training data set, i.e., the error on the training set is driven to a very small value, but when unseen new data is presented to the network the error dramatically increases [29]. In order to address this issue, a technique called dropout, which consists in including a stochastic procedure to the training process, is applied [30].

The accuracy and the generalization capability of the RNN prediction depends on a set of configuration hyper-parameters: number of layers, number of hidden units per layer, activation function, kernel size of a layer, etc. Thus, a promising research line in DL proposes to find specific hyper-parameters configurations for an ANN to improve its numerical accuracy [31, 32]. The results demonstrated that selecting the most suitable hyper-parameters for a given dataset provides more competitive results than using a generalized networks.

Since training an RNN is costly (in terms of computational resources) and the number of RNN architectures is infinite (or extremely large if we impose restrictions to the number of hidden layers or neurons), we are enforced to define a smart search strategy to find an optimal RNN.

Among the many potential optimization techniques to find efficient ANN hyper-parameterization, a few authors have already applied metaheuristics [33, 34]. However, these solutions cannot be directly applied to deep neural networks (DNN), i.e. ANNs with one or more hidden layer, due to the high computational complexity of DNNs. Recently, new solutions specifically defined to address hyper-parameter optimization of DNNs by using metaheurisitcs are emerging: the deep neuroevolutionary approaches [12, 35, 36, 5, 37], showing competitive results in finding parameters that improve the accuracy and minimize the generalization error.

In this study, we focus on applying a deep neuroevolution approach to address the generation of container filling predictions. Our optimization method deals with the next main RNN parameters: the look back (i.e., how many times the net is unfold during the training), the number of hidden layers, and the number of neurons for each hidden layer.

4 Deep Neuroevolutionary Architecture Optimization

In this section we present the details of our proposal. First, we formally state the architecture optimization problem, and then we outline our deep neuroevolutionary approach to solve the problem.

4.1 Architecture Optimization

Optimizing an ANN consists in finding an *appropriate* network structure (architecture) and a set of weights to solve a given problem [26]. Particularly, we can analyze the *suitability* of an ANN by measuring its generalization capability, i.e. the ability to predict/classify new (unseen) data.

In our particular case, we are interested in optimizing the architecture of an RNN. Therefore, we decided to train an RNN using BP (i.e. we are finding an appropriate set of weights given a network structure) and measure the *mean absolute error* (MAE) of the predicted values against the observed ones. Equation 1 states the problem of finding an optimal architecture as a minimization problem, where N corresponds to the number of samples in the testing data set (X,Y), z_i stands for the predicted value of the i-th sample, and y_i corresponds to the ground truth of the i-th sample. Note that the RNN is fed with already predicted data $\hat{x}$, and that the architecture is constraint by B, H, and L.

$$\text{minimize} \quad \text{Fitness} = \frac{1}{N}\sum_{i}^{N} MAE(z_i, y_i) \tag{1}$$

$$\text{subject to} \quad B \leq \text{max_look_back} \tag{2}$$

$$H \leq \text{max_hidden_layers} \tag{3}$$

$$L \leq \text{max_neurons_per_layer} \tag{4}$$

$$\hat{x}_i = \begin{cases} x_0 & \text{if } i = 0 \\ z_{i-1} & \text{if } i > 0 \end{cases} \tag{5}$$

4.2 Deep Neuroevolution

To solve the problem stated in Equation 1 we designed a deep neuroevolutionary algorithm based on the $(1+1)$ Evolutionary Strategy (ES) [6] and on the Adam weights optimizer [38]. Our proposal is presented in Algorithm 1.

A **solution** represents an RNN architecture and it is encoded as an integer vector of variable length, solution=$< s_0, s_1, ..., s_H >$. The first element, $s_0 \in [1, \text{max_look_back}]$, corresponds to the *look back*, while the following elements ($s_j, j \in [1, H]$), correspond to the number of Long Short-Term Memory (LSTM) cells of the j-th hidden layer, subject to $s_j \in [1, \text{max_neurons_per_layer}]$ and $H \in [1, \text{max_hidden_layers}]$. Note that the number of hidden layers is defined by the length of the vector. The number of neurons of the output layer is defined accordingly to the inputed time series, i.e. we add a *dense* layer (fully

Algorithm 1 Self Adapting (1+1)ES-based RNN architecture optimizer.

```
1: solution ← Initialize()
2: Evaluate(solution, evaluation_epochs)
3: evaluations ← 1
4: while evaluations ≤ max_evaluations do
5:    mutated ← Mutate(solution, mut_element_p, mut_length_p, max_step)
6:    Evaluate(mutated, evaluation_epochs)
7:    if Fitness(mutated) ≤ Fitness(solution) then
8:       solution ← mutated
9:    end if
10:   evaluations ← evaluations + 1
11:   SelfAdapting()
12: end while
13: solution ← Evaluate(solution, final_epochs)
14: return solution
```

connected) with a number of neurons equal to the number of dimensions of the output.

First, the **Initialize** function creates a new random solution. Then, the **Evaluate** function computes the **Fitness** of the solution. Specifically, the solution is decoded (into an RNN), then the net is trained using the Adam optimizer [38] for *evaluation_epochs* epochs using the *training data set* and finally the fitness value is computed using the *testing data set*.

Then, while the number of evaluations is less or equal than *max_evaluations*, the evolutionary process takes place. Starting from a solution, the **Mutate** function generates a new **mutated** solution, which is later evaluated. The Mutate function consists in a two step process applied to the inputed solution. In the first step, with a probability equal to *mut_element_p* the j-th element of the solution is perturbed by adding a uniformly drawn value in the range [-*max_step*,*max_step*]. In the second step, with a probability equal to *mut_length_p* the length of the solution is modified by copying or removing (with equal probability) an element of the solution. Before returning the new solution, a *validation* process is performed to assure that the mutated solution is valid (i.e. its values complies with the restrictions).

Next, the fitness of the original solution and the mutated one are compared. If the fitness of the mutated is less or equal than the original solution, the mutated replaces the original solution.

As the last part of the evolutionary process, a **SelfAdapting** step is performed to improve the performance of the evolutionary process [39]. Particularly, if the fitness of the mutated solution improves the original one, then the *mut_element_p* and *mut_length_p* values are multiplied by 1.5, in other case these probabilities are divided by 4 [39]. In other words, if we are not improving, we narrow the local search space. On the contrary, while the solutions are improving (in terms of the fitness), we widen the local search space.

Finally, the evolved solution is evaluated (using *final_epochs* to feed the number of epochs of the training process) and returned.

5 Experimental Study

We implemented our proposal in Python 3, using the DL optimization library **dlopt** [40], and the DL frameworks **keras**[1] and **tensorflow** [41]. Then, we (*i*) selected a data set to test our proposal, (*ii*) optimized an RNN to tackle the referred problem, and (*iii*) compared our predictions against the state-of-the-art of urban waste containers filling level prediction.

5.1 Data set: Filling Level of Containers

The data set analyzed in this article is the one used in [24, 13], a real case study of an Andalusian city (Spain), where we highlight the benefits of our approach, being effective and realistic at the same time. Our case study considers 217 paper containers from the metropolitan area of a city. The choice of an instance of recycling waste (paper) is more attractive than a organic waste collection to show the quality of our approach because most paper containers do not need to be collected everyday like the organic waste, so they have a high variability in collection frequency.

5.2 RNN Optimization

We executed 30 independent times our deep neuroevolutionary algorithm considering the combinatorial search space defined in Table 1, using the data set described above, the parameters defined in Table 2, and a fixed *dropout* equal to 0.5. We use an 80% of the data to train the networks and the remainder data to test their performance (i.e., computing the fitness).

Table 1: RNN optimization search space.

Parameter	Value	Parameter	Value
min_look_back	2	max_look_back	30
min_neurons_per_layer	10	max_neurons_per_layer	300
min_hidden_layers	1	max_hidden_layers	8

The initial setup of the algorithm is taken from the related literature [12]. Considering that our proposal performs a self-adapting step, we do not performed a tuning of the parameters of the algorithm.

Table 3 summarizes the results obtained. The MAE, the mean squared error (MSE), the total number of LSTM cells, the look back, and the number of recurrent layers correspond to the statistics computed over the final solutions (30 RNN trained). We will refer to the solution returned by the algorithm as *solution*. The time corresponds to the statistics computed over the total time, i.e. the sum of the computation time of all the architectures evaluated, including the solution. The time is presented in minutes.

[1] https://keras.io/

Table 2: ES parameters configuration.

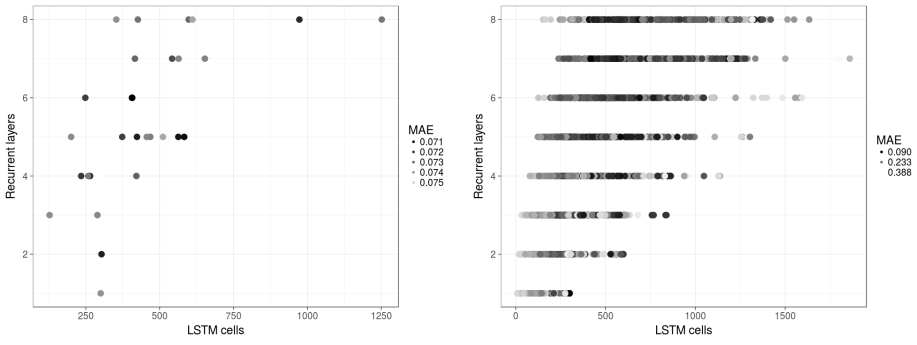
Parameter	Value	Parameter	Value
mut_element_p	0.2	evaluation_epochs	10
mut_length_p	0.2	final_epochs	1000
max_step	15	max_evaluations	100

Table 3: ES-based RNN optimization results.

	MAE	MSE	LSTM cells	Look back	Rec. layers	Time [m]
Mean	0.073	0.014	450.667	5.933	5.433	96.866
Median	0.073	0.014	419.500	5.000	5.000	70.049
Min	0.071	0.013	127.000	2.000	1.000	33.216
Max	0.076	0.015	1252.000	16.000	8.000	405.339
Sd	0.001	0.000	227.661	3.648	1.906	75.488

The results show that the algorithm is *robust* in regard to the MAE (and the MSE), however there is a noticeable variation in the architectures and in the time needed to compute a solution. In order to get insights into the relation between the architecture and the error we analyze the solutions and all the architectures evaluated during the optimization. Figure 1a presents the architectures (number of LSTM cells and layers) of the solutions along with their respective MAE and Figure 1b shows the same information for all architectures evaluated. A small MAE (a darker dot) is desirable. It is important to remark that the MAE presented in both figures is *not comparable*, because in both cases the number of training epochs is different, therefore the results are expected to differ (at least in their magnitude).

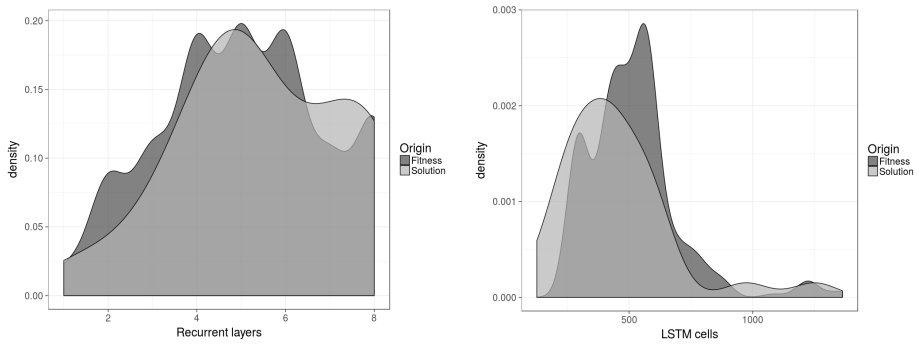
It is quite interesting that the solutions are very diverse (see Figure 1a), and that most of them use less than 500 LSTM cells. This is more interesting if we consider that the maximum allowed number of LSTM cells given the problem restrictions (see Table 1) is equal to 2400 and that many architectures evaluated have more than 500 LSMT cells (see Figure 1b).



(a) Solution (b) Fitness

Fig. 1: Architectures evaluated during the optimization process.

To continue with our analysis, we ranked all the architectures evaluated (excluding the solutions) into deciles and selected the top one (i.e. the best architectures evaluated). Then we plot the density distribution of the number of recurrent layers (see Figure 2a) and of the total number of LSTM cells (see Figure 2b). We also plot the density distribution of the solutions in both figures. The results show that both densities are relatively similar, therefore we intuit that there is an *archetype* that better suits to the problem. However, further analysis is required to validate this intuition.



(a) Deepness (b) Gross size

Fig. 2: The *best* solutions evaluated (fitness) compared to the final solutions.

5.3 Prediction Benchmark

To continue with the evaluation of our proposal, we benchmark the predictions made by the RNN against the results published in [24, 13]. In order to compare the approaches we compute the "mean absolute error in the filling predictions of the next month" (MM) using the solutions given by our algorithm, i.e. we predict a whole month using an RNN and summed up the predictions per container, then we compute the mean absolute difference between the predicted values and the ground truth. Table 4 summarizes the results of the MM computed using the solutions. Note that the MM results are better than the MAE (see Table 3).

Table 4: MM statistics computed for the RNN solutions.

	Mean	**Median**	**Min**	**Max**	**Sd**
RNN	0.030	0.028	0.027	0.043	0.004

We selected the median solution (in regard to the MM) and compared the results against the ones presented in [24, 13]. Table 5 presents the benchmark. In that previous work the authors proposed three time series algorithms used for forecasting the fill level for all containers. Particularly, they used techniques based on Linear Regression, Gaussian Processes, and Support Vector Machines for Regression called SMReg.

The results indicate that our proposal exceeds its competitors. Moreover, we performed a non-parametric Friedman's Two-Way Analysis of Variance Ranks Test that revealed RNN as the best algorithm, followed by the algorithm based on Gaussian Processes, the Lineal Regression and the SMReg as last algorithm in the comparison. Regarding the statistical significant differences, the values have been adjusted by the Bonferroni correction for multiple comparisons. There are significant differences between each pair of algorithms except for the particular comparison between Lineal Regression and SMReg. Thus, the RNN is significantly better than its competitors (in regard to the MM).

Table 5: MM statistics for the RNN solutions.

Method	**Error**
RNN	**0.028**
Gaussian Processes	0.038
Linear Regression	0.074
SMReg	0.095

Finally, to relate the results presented in this subsection (see Table 4) to the ones presented in the previous subsection (see Table 3) we plotted the relation between the MAE and the MM (please refer to Fig. 3). The figure also includes the architecture of the solutions (number of LSTM cells and number of recurrent layers). Something that caught our attention is that there is not an apparent linear relation between both metrics presented in the plot, however the summarized results presented for both metrics (see tables 3 and 4) are robust in regard to the referred error measurement.

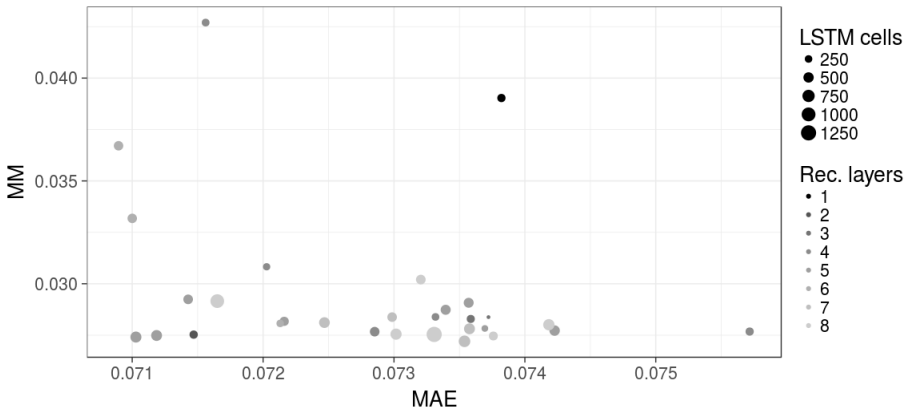


Fig. 3: Relation between the MAE and the MM.

6 Conclusions and Future Work

Deep neuroevolution has emerged as a promising field of study and is growing rapidly. Particularly, the use of Evolutionary Algorithms to tackle the hyper-parametrization optimization problem is showing unprecedented results, not only in terms of the performance of the designed networks, but also in terms of the reduction of the computational resources needed (e.g. the configurations are evaluated using a heuristic, therefore not all configurations are actually trained [42, 43]).

In this study we present a deep neuroevolutionary algorithm to optimize the architecture of an RNN (given a problem). We test our proposal using the filling level of 217 waste containers located in Andalusia, Spain, recorded over a whole year and benchmark our results against the state-of-the-art of filling level prediction. Our experimental results show that an "appropriate" selection of the architecture improves the performance (in terms of the error) of an RNN and that our prediction results exceeds all its competitors.

As future work we propose to explore train-free approaches for evaluating a network configuration. Specifically, we propose to study the use of the MAE random sampling [42, 43] to compare RNN architectures, aiming to reduce the computational power and the time needed to find an appropriate architecture.

Acknowledgements

This research was partially funded by Ministerio de Economía, Industria y Competitividad, Gobierno de España, and European Regional Development Fund grant numbers TIN2016-81766-REDT (http://cirti.es), and TIN2017-88213-R (http://6city.lcc.uma.es), and by Universidad de Málaga, Campus Internacional de Excelencia Andalucía TECH.

References

1. Bakici, T., Almirall, E., Wareham, J.: A Smart City Initiative: the Case of Barcelona. Journal of the Knowledge Economy **4**(2) (2013) 135–148
2. Ghisellini, P., Cialani, C., Ulgiati, S.: A review on circular economy: The expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. Journal of Cleaner Production **114** (2016) 11–32
3. Tukker, A.: Product services for a resource-efficient and circular economy - A review. Journal of Cleaner Production **97** (2015) 76–91
4. Teixeira, J., Antunes, A.P., de Sousa, J.P.: Recyclable waste collection planning—a case study. European Journal of Operational Research **158**(3) (nov 2004) 543–554
5. Ojha, V.K., Abraham, A., Snášel, V.: Metaheuristic design of feedforward neural networks: A review of two decades of research. Engineering Applications of Artificial Intelligence **60** (2017) 97 – 116
6. Back, T.: Evolutionary Algorithms in Theory and Practice: Evolution Strategies, Evolutionary Programming, Genetic Algorithms. Oxford university press (1996)

7. Ferrer, J., García-Nieto, J., Alba, E., Chicano, F.: Intelligent testing of traffic light programs: Validation in smart mobility scenarios. Mathematical Problems in Engineering **2016** (2016) 1–19
8. Garcia-Nieto, J., Ferrer, J., Alba, E.: Optimising traffic lights with metaheuristics: Reduction of car emissions and consumption. In: International Joint Conference on Neural Networks. (2014) 48–54
9. Massobrio, R., Toutouh, J., Nesmachnow, S., Alba, E.: Infrastructure deployment in vehicular communication networks using a parallel multiobjective evolutionary algorithm. International Journal of Intelligent Systems **32**(8) (2017) 801–829
10. Nesmachnow, S., Rossit, D., Toutouth, J.: Comparison of multiobjective evolutionary algorithms for prioritized urban waste collection in montevideo, uruguay. Electronic Notes in Discrete Mathematics (2018) In press.
11. Toutouh, J., Rossit, D., Nesmachnow, S.: Computational intelligence for locating garbage accumulation points in urban scenarios. In: International Conference on Learning and Intelligent Optimization, LION 12, Springer (2018) 1–15
12. Camero, A., Toutouh, J., Stolfi, D.H., Alba, E.: Evolutionary Deep Learning for Car Park Occupancy Prediction in Smart Cities. In: Learning and Intelligent OptimizatioN Conference LION. (2018)
13. Ferrer, J., Alba, E.: BIN-CT: Urban Waste Collection based in Predicting the Container Fill Level. (jul 2018)
14. Garvin, B.J., Cohen, M., Dwyer, M.B.: Evaluating improvements to a meta-heuristic search for constrained interaction testing. Empirical Software Engineering **16**(1) (2011) 61–102
15. Sahoo, S., Kim, S., Kim, B.I., Kraas, B., Popov Jr., A.: Routing Optimization for Waste Management. Interfaces **35**(1) (2005) 24–36
16. Dat, L.Q., Truc Linh, D.T., Chou, S.Y., Yu, V.F.: Optimizing reverse logistic costs for recycling end-of-life electrical and electronic products. Expert Systems with Applications **39**(7) (2012) 6380–6387
17. Alagöz, A.Z., Kocasoy, G.: Improvement and modification of the routing system for the health-care waste collection and transportation in İstanbul. Waste Management **28**(8) (2008) 1461–1471
18. Beliën, J., De Boeck, L., Van Ackere, J.: Municipal Solid Waste Collection and Management Problems: A Literature Review. Transportation Science **48**(1) (feb 2014) 78–102
19. Xu, L., Gao, P., Cui, S., Liu, C.: A hybrid procedure for MSW generation forecasting at multiple time scales in Xiamen City, China. Waste management (New York, N.Y.) **33**(6) (jun 2013) 1324–31
20. Cole, C., Quddus, M., Wheatley, A., Osmani, M., Kay, K.: The impact of Local Authorities' interventions on household waste collection: a case study approach using time series modelling. Waste management (New York, N.Y.) **34**(2) (feb 2014) 266–72
21. Tung, D.V., Pinnoi, A.: Vehicle routing-scheduling for waste collection in Hanoi. European Journal of Operational Research **125**(3) (2000) 449–468
22. Sniezek, J., Bodin, L.: Using mixed integer programming for solving the capacitated arc routing problem with vehicle/site dependencies with an application to the routing of residential sanitation collection vehicles. Annals of Operations Research **144**(1) (apr 2006) 33–58
23. Bodin, L., Mingozzi, A., Baldacci, R., Ball, M.: The rollon–rolloff vehicle routing problem. Transportation Science **34**(3) (2000) 271–288
24. Ferrer, J., Alba, E.: BIN-CT: sistema inteligente para la gestión de la recogida de residuos urbanos. In: International Greencities Congress. (2018) 117–128

25. LeCun, Y., Bengio, Y., Hinton, G.: Deep learning. nature **521**(7553) (2015) 436
26. Haykin, S.: Neural networks and learning machines. Volume 3. Pearson (2009)
27. Rumelhart, D., Hinton, G.E., Williams, R.j.: Learning Internal Representations by Error Propagation. Technical Report No. ICS-8506, California Univ San Diego La Jolla Inst for Cognitive Science (1985)
28. Jaeger, H.: Tutorial on training recurrent neural networks, covering BPPT, RTRL, EKF and the echo state network approach. Volume 5. GMD (2002)
29. Reed, R., Marks, R., Oh, S.: Similarities of error regularization, sigmoid gain scaling, target smoothing, and training with jitter. IEEE Transactions on Neural Networks **6**(3) (1995) 529–538
30. Srivastava, N., Hinton, G., Krizhevsky, A., Sutskever, I., Salakhutdinov, R.: Dropout: A simple way to prevent neural networks from overfitting. The Journal of Machine Learning Research **15**(1) (2014) 1929–1958
31. Bergstra, J., Yamins, D., Cox, D.: Making a science of model search: Hyperparameter optimization in hundreds of dimensions for vision architectures. In: International Conference on Machine Learning. (2013) 115–123
32. Jozefowicz, R., Zaremba, W., Sutskever, I.: An empirical exploration of recurrent network architectures. In: International Conference on Machine Learning. (2015) 2342–2350
33. Alba, E., Martí, R.: Metaheuristic Procedures for Training Neural Networks. Volume 35. Springer Science & Business Media (2006)
34. Yao, X.: Evolving artificial neural networks. Proceedings of the IEEE **87**(9) (1999) 1423–1447
35. Miikkulainen, R., Liang, J., Meyerson, E., Rawal, A., Fink, D., Francon, O., Raju, B., Shahrzad, H., Navruzyan, A., Duffy, N., Hodjat, B.: Evolving Deep Neural Networks. arXiv preprint arXiv:1703.00548 (2017)
36. Morse, G., Stanley, K.O.: Simple evolutionary optimization can rival stochastic gradient descent in neural networks. In: Proc. of the Genetic and Evolutionary Computation Conf. 2016. GECCO '16, ACM (2016) 477–484
37. Su, X., Yan, X., Tsai, C.L.: Linear regression. Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics **4**(3) (2012) 275–294
38. Kingma, D.P., Ba, J.: Adam: A method for stochastic optimization. arXiv preprint arXiv:1412.6980 (2014)
39. Doerr, C.: Non-static parameter choices in evolutionary computation. In: Genetic and Evolutionary Computation Conference, GECCO 2017, Berlin, Germany, July 15-19, 2017, Companion Material Proceedings, ACM (2017)
40. Camero, A., Toutouh, J., Alba, E.: DLOPT: Deep learning optimization library. arXiv preprint arXiv:1807.03523 (july 2018)
41. Abadi, M., Barham, P., Chen, J., Chen, Z., Davis, A., Dean, J., Devin, M., Ghemawat, S., Irving, G., Isard, M., et al.: Tensorflow: A system for large-scale machine learning. In: OSDI. Volume 16. (2016) 265–283
42. Camero, A., Toutouh, J., Alba, E.: Comparing deep recurrent networks based on the mae random sampling, a first approach. In: Conference of the Spanish Association for Artificial Intelligence (CAEPIA) 2018, Springer (2018) 1–10
43. Camero, A., Toutouh, J., Alba, E.: Low-cost recurrent neural network expected performance evaluation. arXiv preprint arXiv:1805.07159 (may 2018)

Structural Analysis, Modeling and Forecasting of Electricity Prices of the Iberian Electricity Market

Jenice Ramos[1], Ângela Ferreira[2] and Paula O. Fernandes[3]

[1] Polytechnic Institute of Bragança, Campus de Santa Apolónia, 5300-253 Bragança, Portugal
[2] Research Centre in Digitalization and Intelligent Robotics (CeDRI), Polytechnic Institute of Bragança, Bragança, Portugal
[3] Applied Management Research Unit (UNIAG), Polytechnic Institute of Bragança, Bragança, Portugal
ramosgonjenice@gmail.com, apf@ipb.pt, pof@ipb.pt

Abstract. The Iberian Electricity Market (MIBEL) resulted from a cooperation process developed by the Portuguese and Spanish administrations aiming to promote the integration of the electrical systems of both countries. With the liberalization of the electricity markets, price forecasting has become fundamental to the process of decision-making and strategy development by market participants. The unique characteristics of electricity prices such as non-stationarity, non-linearity and high volatility make this task very difficult. For this reason, instead of a simple timely forecast, market participants are more interested in a causal forecast that is essential to estimate the uncertainty involved in the price. This work analyses the impact of external variables on energy prices such as Per Capita Consumption, Heating Degrees-day, Cooling Degrees-day, Hydroelectric Productivity Index and Industrial Productivity Index, using a Multiple Linear Regression Model. From the models' application, it was observed adjusted coefficients of determination for the energy prices in Portugal of, approximately, 54% and 28%, for 2017 and 2018 years, respectively. Under the same time frame, adjusted coefficients of determination for the Spanish energy market are 52%, for 2017 year and 29%, for 2018.

Keywords: Energy Pricing Forecast, MIBEL, Multiple Linear Regression Model.

1 Introduction

The Iberian Electricity Market-MIBEL outcomes from a cooperative process developed by the Portuguese and Spanish governments aiming at promoting the integration of the electrical systems and markets of both countries. The MIBEL is organized in two poles, the Spanish Iberian Market Operator (OMIE), which provides the contracting of the Daily and Intraday Market and the Portuguese Market Operator (OMIP), which ensures the derivative markets.

With the MIBEL' implementation, the Iberian electricity market was moved to a liberalized market regime, being also an important step in the consolidation of the European Electricity Market. In this sense, it became possible for any Iberian consumer to acquire electricity from any producer or marketer operating in Portugal or Spain, under a regime of free competition [1].

The market price is established through a process in which the electricity price is the lowest one that guarantees the satisfaction of the demand by the supply [3]. Due to the its liberalized nature, electricity prices acquire volatile and uncertain characteristics, since they are obtained through proposals of supply and purchase of energy. In this competitive environment, it is imperative to predict the future price of energy, aiming the definition of a dispatch strategy, increasing the profit of energy producers and assisting a decrease in the electricity price for consumers.

The main objective of this work is the construction of statistical (or casual) models to forecast energy prices, in a monthly basis, in the time span of 2017 and 2018 years, through the Multiple Linear Regression Model (MRLM).

The paper is organized as follows: session 2 presents the main factors which may contribute to the variability of energy prices; session 3 introduces and discusses the forecasting methodology, while session 4 presents and discusses its application in the Iberian countries. Finally, session 5 draws the main conclusions and outlines the future work.

2 Key Factors Affecting Electricity Prices

One of the most notorious characteristics of energy prices is their extreme volatility. This means that, throughout the year, there may be sharp price changes. Therefore, it is necessary to analyse the variables that are able to explain, even though partially, the variability of prices.

Unique features of energy pricing such as non-stationarity, non-linearity and high volatility make the forecast of energy prices task difficult. For this reason, instead of a simple one-off forecast, market players are more interested in a causal forecast able to estimate the uncertainty involved in price.

From a large number of external variables able to affect the electric energy prices, the ones that have demonstrated a higher correlation with the electric energy price are Consumption Per Capita (CPC), Heating and Cooling Degrees-days (HDD and CDD, respectively), Hydroelectric Productivity Index (HPI) and Industrial Productivity Index (IPI).

Sudden changes in electric energy consumption can lead to spikes in energy prices. The energy demand is interrelated with meteorological conditions, for instance heating and cooling requirements, here accessed through technical indexes based on weather conditions, HDD and CDD variables [4], which describe the requirements of the energy demand for heating and cooling (air conditioning) of buildings. These variables are derived from meteorological observations of the air temperature and interpolated in regular networks with a resolution of 25 km in Europe. These variables present a complementary characteristic throughout the year, that is, they are a quantification of the

degrees Celsius required for heating in the winter months, and cooling in the summer months.

The availability of the hydric resource, due to its high penetration in the Iberian electricity market also impacts in the energy prices. The Hydroelectric Productivity Index (HPI) [5], reckons the deviation of the total amount of electric produced from hydric resources in a given period, related to the one which would occur if an average hydrological regime occurred. The latter is evaluated taking into account 30 historical hydrological regimes. If HPI is higher than 1, the period under analysis is considered wet, and if HPI is lower than 1, from the hydrological point of view, it is considered dry.

The Industrial Productivity Index (IPI) [6] measures changes in the volume of production of goods at short and regular intervals, relative to a period taken as a reference. Under the assumption of stability of technical coefficients, this index also measures the trend of value added in volume. Doing so, its relation to the energy demand also affects the energy price.

3 Forecasting Research Methodology

Numerous methods of forecasting energy prices have been proposed over the last years. Typically, these models fall into three types of time horizon, short term (hours to days), medium term (months) or long term (years). However, there is no consensus on the limits of each models.

From the several developed models of forecasting, multi agent simulation models, statistic and Artificial Intelligence based models stand out. It is also noteworthy the growing use of hybrid models, combining those methodologies [3].

The present work is based on the use of statistical models. These models help to produce forecasts for a dependent variable, which in the case under study, is the variable energy price, as a combination of independent variables that may have influence on the energy price. In this context, the model chosen for energy pricing is the Multiple Linear Regression Model (MLRM).

3.1 Multiple Linear Regression Model

The MLRM is a statistical model that assumes there is a linear relationship between a variable *Y* (the dependent variable) and *X* independent variables. The independent variables exogenous, explanatory, non-stochastic and observable, used to explain the variation of the variable *Y*. A model that comprises more than one independent variable is a multiple regression between a dependent variable and a set of n+1 independent variables assuming a linear form and stochastic because it includes an error term [7]. The Multiple Linear Regression Model is given by [8]:

$$\begin{aligned} &Y_t = b_0 + b_1 X_{1t} + b_2 X_{2t} + b_j X_{jt} + \ldots + b_k X_{kn} + u_t \\ &t = 1, 2, \ldots, n,\ j = 1, 2, \ldots, k \end{aligned} \tag{1}$$

where b_0 is the y-intercept, b_j represents the parameters of the model, and u_t is the error term.

A casual association is not assumed between dependent and independent variables. In this sense, the dependent variable, Y, depends on a set of n+1 known factors and an unknown factor, being an endogenous variable, explained, stochastic or random and observable [8].

Typically, the linear regression model uses the following assumptions [12]:

- The regression mode is linear as proposed in (1);
- The regressors are assumed to be fixed or non stochastic in the sense that their values are fixed in repeated sampling;
- Given the values of the independent variables, the expected value of the error term is zero;
- The variance of each error term, given the values of independent variables, is constant or homoscedastic;
- There is no correlation between two error terms, i.e., there is no autocorrelation;
- There are no perfect linear relationships among the dependent variables, i.e., there is no multicollinearity;
- The regression model is correctly specified.

Based on the assumptions mentioned above, the most popular method for parameters estimation, the Ordinary Least Squares (OLS), provides estimators which have several desirable statistical properties, such as [13]:

- The estimators are linear, which means that they are linear functions of the dependent variable, *Y*;
- The estimators are unbiased, which means that, in repeated applications of the method, on average, they are equal to their true values;
- The estimators are efficient, which means that they have minimum variance.

3.2 Measures of Forecasting Accuracy

The main purpose of the whole modelling and forecasting process is to clearly discern the future values of the dependent variable, and the most important criterion of all is how accurately a model does this. The most familiar concept of forecasting accuracy is evaluated through the error magnitude accuracy, e_t, which relates to forecast error with a particular forecasting model. This is defined as [9]:

$$e_t = A_t - F_t \tag{2}$$

being A_t the actual value and F_t its forecast in the time period, t.

Although there are a number of forecasting errors that can be used for accurate evaluation, in this work it is used the Mean Absolute Percentage Error (MAPE), expressed in generic percentage terms and it is computed by [12]:

$$MAPE = \frac{1}{n}\sum_{t=1}^{n}\left|\frac{A_t - F_t}{A_t}\right| \tag{3}$$

4 Electric Energy Price Modelling and Forecasting

4.1 Data sample and generic model

The modelling methodology used the historical data from January 2010 till December 2015, in a total of 72 observations. The year 2016 was used to validate the model, and the years 2017 and 2018 used to produce the forecasts and to build the models, based on the previous validation for 2016, already working with 84 observations (January 2010 till December 2016).

To produce all the results, it was used GRETL statistical software (Gnu Regression, Econometrics and Time-series Library) for Windows. It should be noted that the data of the variables presented above were collected from the Eurostat [4], REE [14], REN [15] , INE of Spain [10] and INE of Portugal [10] databases.

The model to be created is no more than a representation of the relations between the variables at the same moment of time according to (1). Energy Prices (EP) modelling and forecasting, for the Portuguese and Spanish markets, used the following econometric model:

$$EP_t = a + b_0 CPC_t + b_1 HDD_t + +b_2 CDD_t + +b_3 GDA_t + \\ +b_4 HPI_t + b_5 IPI_t + e_t \quad (4)$$

It should be noted models of Portugal and Spain interrelate the electric energy price with explanatory variables for each country.

4.2 Energy Prices Modeling for Portugal

The results obtained for Portugal with the Multiple Linear Regression Model, estimated by the application of the Ordinary Least Squares Method for 2017 are presented in Table 1.

Table 1. Performance Measures of the Estimated Model for Portugal for 2017.

	Coefficient	**Error**	**ratio-t**	***p-value***	**Significance**	**VIF**
Const	−25,2669	23,1584	−1,091	0,2786		
IPIP	−0,191297	0,0853043	−2,243	0,0278	**	1,436
CPCP	0,122396	0,0326736	3,746	0,0003	***	3,802
HDDP	−0,0870782	0,0188241	−4,626	1,46E-05	***	5,758
CDDP	−0,0900926	0,0486428	−1,852	0,0678	*	2,69
HPIP	−15,1130	1,67964	−8,998	1,09E-13	***	1,022
Mean var. dependent	*44,40357*	***D.S. var. dependent***	*10,56537*			
White Test (TR^2)	*21,778043*	***Durbin-Watson***	*1,041234*			
R^2	*0,565662*	***R^2 adjusted***	*0,53782*			
F (5, 78)	*20,31672*	***p-value (F)***	*6,31E-13*			

*Notes: *, Significance of 10%; **, Significance of 5%; ***, Significance of 1%.*

The obtained coefficient of determination is 0.56562, which indicates that the variables Per Capita Consumption, Heating/Cooling Degree Days, Hydroelectric Productivity Index and Industrial Productivity Index and main variables markets, explained about 57% of the variations that occurred in the electric energy prices in Portugal. The adjusted coefficient of determination is 0.53 which indicates that about 53% of the changes in electricity prices were explained by the variations in the independent variables.
From obtained results shown above, in Table 1, it is possible to conclude:

- The autonomous component indicates that -25.2669 of the electricity prices for Portugal are not explained by independent variables. However, this variable does not reveal a statistically significant value.
- If the variables Industrial Productivity Index, Heating/Cooling Degree Days and the HPIP varies by one unit, the Energy Price variable decreases, and it is evident that they have a negative relation between them. All these variables are statistically significant.
- The variable Per Capita Consumption Portugal, has a positive relation with the Energy Price: if the first one varies one unit, the Portuguese Price variable increases by approximately 0.122396 units. This variable is statistically significant, with a significance level of 1%.
- Regarding the *F* statistic (5.78), there is sufficient statistical evidence to verify that there are variables that assume values other than zero and, as previously mentioned, the variables included in the model explain satisfactorily the changes in electricity prices in Portugal.
- From the analysis of the violation of the basic hypotheses of the model, in terms of multicollinearity and based on the values of the Variance Inflation Factor (VIF), there is no violation of the basic hypothesis of multicollinearity, since the VIF values, for all variables, are not higher than 10. It can be concluded that there is no dependence on explanatory variables.
- The test of the normality of the residue made through the test statistic (χ^2 = 0.579, with test value = 0.7486, which means that this model follows a normal distribution at a significance level of 1%, so this hypothesis is not violated. the mean is equal to μ = -4,22946e-0177,1827; this value is approximately zero then the zero-mean hypothesis is also not violated E (μ) = 0;
- For homoscedasticity, a constant variance of the error term was verified by the White test for heteroskedasticity and the test statistic TR^2= 21.778043 with test value (χ^2 (20)> 21.778043) = 0.35675. As the test value is higher than 10%, it can be concluded that there is no violation of homoscedasticity, that is, the variance is constant observation for observation. There is no loss of the characteristics of OLS estimators, since they remain BLUE;
- The Durbin-Watson statistic = 1.041234 lies in the zone of positive autocorrelation of the errors. Then, it can be concluded that there is an infringement of the independence of the error term and that this model suffers from autocorrelation of the errors. In order to correct the infraction hypothesis, the Cochrane-Orcutt test was applied.

Accordingly, the following statistic was obtained: Durbin-Watson = 2.025485, which is now in the zone of independence of the errors.

In order, to be able to model and predict prices for 2018, it was necessary to create a trend line from the price of electricity for Portugal and create 12 dummies (dm) or Periodic Auxiliary Variables that represent each of the months of the year of 2018. Subsequently, the least squares method is applied. These auxiliary variables were created as aids to the model, due to the absence of data from the independent variables referring to the year 2018, from May 2018.

Table 2. Performance Measures of the Model with Periodic Auxiliary Variables for 2018.

	Coefficient	**Error**	**ratio-t**	***p-value***	**Significance**
Time	0,05542	0,033433	1,658	0,1012	
dm1	42,6982	3,49385	12,22	3,03E-20	***
dm2	36,4877	3,50774	10,4	1,05E-16	***
dm3	32,5611	3,52189	9,245	2,11E-14	***
dm4	31,5256	3,53631	8,915	9,67E-14	***
dm5	39,099	3,55097	11,01	6,64E-18	***
dm6	44,9773	3,56589	12,61	5,45E-21	***
dm7	46,4994	3,58106	12,98	1,09E-21	***
dm8	45,9265	3,59648	12,77	2,76E-21	***
dm9	48,3898	3,61214	13,4	1,87E-22	***
dm10	49,1344	3,62804	13,54	1,00E-22	***
dm11	45,7027	3,64418	12,54	7,45E-21	***
dm12	49,2064	3,49941	14,06	1,13E-23	***
Mean var. dependent	*45,4093*		***D.P. var. dependent***		*10,589*
White Test (TR^2)	*35,935126*		***Durbin-Watson***		*0,6786*
R^2	*0,3679*		***R^2adjusted***		*0,2765*
F (12, 83)	*4,0258*		***value P(F)***		*0,0001*

It is also necessary to verify that the model for 2018 does not violate the infractions in order to be able to validate it. Based on the information presented in the previous table, the following can be concluded regarding the violation of the model hypotheses for 2018:

- All auxiliary variables are statistically significant at a significance level of 1%.
- Based on the Inflation Factor of the variance, it is verified that there is no violation of the basic hypothesis of multicollinearity.
- The test of normality of the residue made through the test statistic χ^2= 1.077, with test value = 0.58369, means that this model follows a normal distribution at a significance level of 1%, so this hypothesis is not violated.

- Constant variance of the error term, by White test for heteroscedasticity, as the value of evidence higher than 10%, from which, there is no violation of homoscedasticity.
- The Durbin Watson statistic = 0.6778602 was found in the zone of positive autocorrelation of the errors, meaning that there is an infraction to the independence of the error term. To overcome the previously verified infraction, the Cochrane-Orcutt test was applied. Accordingly, the following statistic was obtained by Durbin-Watson = 1.994749, which translates in independence of the errors.

4.3 Energy Prices Modelling for Spain

Following the same methodology as described in previous section, the model obtained for Spain, in 2017 (Table 3), presents a coefficient of determination of 0.550964 and indicates that the variables Per Capita Consumption, Heating/Cooling Degree Days, Hydroelectric Productivity Index and Industrial Productivity Index explain 55.1 % changes in energy prices in Spain in 2017. The adjusted coefficient of determination is 0.52, which indicates that about 52% of the changes in energy prices in Spain are explained by the independent variables.

Table 3. Performance Measures of the Estimated Model for Spain for 2017.

	Coefficient	**Error**	**ratio-t**	***p-value***	**Significance**	**VIF**
Const	14,346	22,6092	0,6345	0,5276		
IPIE	−0,178757	0,112919	−1,583	0,1175		1,621
CPCE	0,074336	0,03064	2,426	0,0176	**	4,036
HDDE	−0,0422069	0,015252	−2,767	0,0071	***	6,562
CDDE	−0,0834428	0,057153	−1,460	0,1483		6,493
HPIE	−13,7937	1,65802	−8,319	2,26E-12	***	1,026
Mean var. dependent	*44,30881*	***D.S. var. dependent***		*10,18166*		
White Test (TR^2)	*27,338403*	***Durbin-Watson***		*0,859692*		
R^2	*0,550964*	***R^2 adjusted***		*0,522179*		
F (5, 78)	*19,14107*	***value***		*2,23E-12*		

Note: *, Significance of 10%; **, Significance of 5%; ***, Significance of 1%.

Based on the results obtained and presented in the table above, it can be concluded that:

- The autonomous component shows that 14,346 of electricity prices in Spain are not explained by the independent variables. This variable is not a statistically significant variable.
- There is an inverse relationship between variables Industrial Productivity Index, Heating/Cooling Degree Days, Hydroelectric Productivity Index and energy price in Spain. Only variables Consumption per Capita, Heating Degree Days and Hydroelectric Productivity Index are statistically significant.

- Per Capita Consumption has a positive relation with the energy price, being statistically significant, at a significance level of 5%.
- As for the statistic of F (5,78) = 19,14107, with a test value lower than 1%, there is sufficient statistical evidence that there are variables that assume values different from zero and as previously mentioned, the variables included in the model explain in a satisfactory way the variations occurred in the prices of electric energy in Spain.
- Regarding the analysis of the infraction to the basic hypotheses of the model, considering the VIF, it is verified that there is no infringement of the basic hypothesis of multicollinearity, since values for any of the variables are less than 10. There is no correlation between the explanatory variables.
- The test of normality of the residue performed through the test statistic χ^2= 0.228, with test value = 0.8925, means that this model follows a normal distribution at a significance level of 1%, so this hypothesis not is not violated. The mean value is approximately zero, so the zero-mean hypothesis is also not violated E (μ) = 0.
- Constant variance of the error term, through the White test for heteroskedasticity and the test statistic, is higher than 10%, so it can be concluded that there is no violation of homoscedasticity.

Table 4. Performance Measures of the Model with Periodic Auxiliary Variables for 2018.

	Coefficient	**Error**	**ratio-t**	***p-value***	**Significance**
Time	0,061663	0,031961	1,929	0,0571	*
dm1	42,9797	3,34004	12,87	1,80E-21	***
dm2	36,4318	3,35332	10,86	1,29E-17	***
dm3	32,3001	3,36685	9,594	4,25E-15	***
dm4	31,1422	3,38063	9,212	2,46E-14	***
dm5	38,8043	3,39465	11,43	1,01E-18	***
dm6	44,4514	3,40891	13,04	8,60E-22	***
dm7	45,991	3,42341	13,43	1,59E-22	***
dm8	45,4193	3,43815	13,21	4,14E-22	***
dm9	47,6314	3,45312	13,79	3,47E-23	***
dm10	48,2735	3,46833	13,92	2,06E-23	***
dm11	45,0456	3,48375	12,93	1,38E-21	***
dm12	49,2064	3,49941	14,06	1,13E-23	***
Mean var. dependent		*45,29708*	***D.S. var. dependent***		*10,24108*
White test (TR^2)		*36,087775*	***Durbin-Watson***		*0,712452*
R^2		*0,382413*	***R^2 adjusted***		*0,293124*
F (12, 83)		*4,282844*	***Value P(F)***		*0,00003*

As in the case of Portugal, for 2018, it was necessary to create a trend line, based on the electricity price for Spain by using 12 dummies (dm) representing each of the months of the year.

- In the statistical tables for 5 independent variables dL is equal to 1.5219, dU equal to 1.7732, 4-dU equal to 2.2268 and finally 4-dL is equal to 2.48. It was obtained the following Durbin-Watson statistic = 0.858692, which lies in the zone of positive autocorrelation of the errors, meaning that there is an infringement of the independence of the term of error. Following the application of Cochrane-Orcutt test, a Durbin-Watson statistic = 1.996358 is obtained, which satisfies the independence of the errors.

From the information presented in Table 4, it can be verified that the model for 2018 does not violate the infractions, which validates it. All auxiliary variables are statistically significant with a significance level of 1%. Additionally,

- Regarding the analysis of multicollinearity, considering the VIF, it is verified that there is no violation of this hypothesis.
- The test of normality of the residue made through the test statistic = 0.645, with test value equal to 0.7243, which means that this model follows a normal distribution at a significance level of 1%, so this hypothesis is not violated.
- White test has a test value higher than 10%, so it can be concluded that there is no violation of homoscedasticity;
- The Durbin-Watson statistic = 0.712452 was obtained. This value is in the zone of positive autocorrelation of the errors, being necessary to analyse further, using the test of Cochrane-Orcutt to verify if that the infraction can be solved. With the Cochrane-Orcutt test the following Durbin-Watson statistic = 0.2019850 was obtained and, consequently, there is independence of the errors.

4.4 Forecast Results for Portugal and Spain

This section presents the forecasts for the electric energy price, for each of the countries under analysis integrating MIBEL, for the years 2017 and 2018, based on the models created and described in the previous sections.

To evaluate the accuracy of the prediction, it will be used the Absolute Percent Error (APE) and Mean Absolute Percent Error (MAPE). The assumed confidence interval to produce forecasts is 95%. The results obtained for the two models selected with the methodologies used and for the respective statistical measures/indicators are presented in Table 5 and Table 6, for Portugal and Spain, respectively.

Regarding Portugal and year 2017, it can be observed that the difference between the actual and expected value is € 1.65 and the MAPE is 12.61%. Forecasts for 2017 follow the behaviour of real historical prices. For 2018, and considering the known prices, that is, between January 2018 and May 2018, it is notorious that the forecast for 2018 follows the same behaviour. As for the MAPE, in this year, since it can only be calculated for 5 months, a MAPE of 11.52% has been obtained.

From the analysis of the data of average energy price for the Portuguese Market, considering the period of analysis from January 2017 to May 2018, it is verified that this indicates maximum values in the winter months, where variables such as CPC and HDD are higher which may justify the increase in prices. Extrapolating this analysis to the remaining periods, it is possible verify that the energy price registers low values for

the summer months, where the CPC is lower. The minimum values in the energy price are in the months of March and April in both years under analysis. This decrease in price is justified when the months have a very high HPI, from which higher-cost energy sources can be withdrawn from service, thus contributing to the decrease of the energy price.

Table 5. Forecast of Energy Prices for Portugal for 2017 and 2018.

Months	2017			2018		
	Real Price, €/MWh	Forecast Price, €/ MWh	APE	Real Price, €/ MWh	Forecast Price, €/ MWh	APE
January	71,52	56,38	21,17%	49,98	53,16	6,36%
February	51,39	46,44	9,63%	54,88	44,76	18,44%
March	43,95	49,99	13,74%	40,18	39,44	1,84%
April	44,18	54,44	23,22%	42,67	37,52	12,07%
May	47,12	52,78	12,01%	54,92	44,54	18,90%
June	50,22	55,68	10,87%	-	50,08	-
July	48,6	58,19	19,73%	-	51,41	-
August	47,43	51,91	9,45%	-	50,73	-
September	49,16	54,37	10,60%	-	53,14	-
October	56,97	59,71	4,81%	-	53,88	-
November	59,36	54,41	8,34%	-	50,45	-
December	59,49	54,91	7,70%	-	54,43	-
Mean values	***52,45***	***54,10***	***12,61%***	***48,53***	***48,63***	***11,52%***

Table 6. Forecast of Electricity Prices for Spain for 2017 and 2018.

Months	2017			2018		
	Real Price, €/MWh	Forecast Price, €/MWh	APE	Real Price, €/ MWh	Forecast Price, €/ MWh	APE
January	71,49	60,97	14,72%	51,63	52,58	1,84%
February	51,74	44,33	14,32%	54,98	44,3	19,43%
March	43,19	51,83	20,00%	39,75	39,11	1,61%
April	43,69	52,54	20,26%	42,66	37,3	12,56%
May	47,11	53,91	14,43%	55,08	44,58	19,06%
June	50,22	56,99	13,48%	-	50,01	-
July	48,63	57,22	17,66%	-	51,43	-
August	47,46	58,22	22,67%	-	50,81	-
September	49,15	56,19	14,32%	-	53,02	-
October	56,77	57,43	1,16%	-	53,68	-
November	59,19	55,83	5,68%	-	50,48	-
December	57,94	51,61	10,93%	-	54,69	-
Mean Values	***52,22***	***54,76***	***14,14%***	***48,82 €***	***48,50 €***	***10,90%***

As regards electricity prices for Spain (Table 6), it is observed that the forecast values for 2017 are higher by € 2.54. The MAPE obtained for 2017 was 14%, higher than that of Portugal and for the year 2018, about 11%. Analysing the year 2017, it can be verified that the predictions follow the same behaviour of the original series, which allows trusting the model. With reference to the forecast of the mean energy price for the Spanish market, maximum values are also found in winter months, where variables such as CPC, HDD are higher. Similar to the results obtained for Portugal, it can be verified that the energy price registers low values in summer months, when the CPC is lower.

5 Conclusion

The objective of this work was the development of a model for forecasting energy prices in the Iberian Market. MIBEL's electricity prices show great volatility, with spikes, which limits the performance of the models.

The analysis of the relation of the electric energy price with the external variables allows to conclude that the same influence significantly the properties of the distribution of the price. The Hydroelectric Productivity Index is largely responsible for price volatility, with scenarios in which this renewable resource production is high, leading to a decrease in prices.

With respect to Per Capita Consumption, it reveals to be a crucial variable that partly justifies the behaviour of the energy price. Being intrinsically related to the consumption variable, HDD and CDD also have a considerable impact on price variability.

All the variables presented in the model for the Portuguese market are statistically significant variables. As far as the Spanish market is concerned, the variables are not all statistically significant: only the variables CPC, HDD and HPI are statistically significant.

From the analysis of the performance of the models created, the model for Portugal for the year 2017, presents better results than the model applied to Spain. Regarding the forecast models for the year 2018, the model created for Spain presents the best performance and the lowest MAPE. For the year 2018, the model that produced the best results was the model built for the Spanish market, although the difference is not significant.

The establishment of a reference model presents itself as an innovative idea, with the objective of understanding the inexplicability associated to the forecast models. However, as good as some forecasting models may be, there will always be a forecasting error associated with factors and causes that do not depend on model inputs and occur more frequently at certain times of the day, week, month or year. The modeling presented also reflects that factors that influence the Portuguese market may not be the same factors that influence the Spanish market, even they belong to the same energy market.

The quality of the estimated models validates the use of statistical or causal methods, such as the Multiple Linear Regression Model, as a plausible strategy to obtain causal forecasts of energy prices.

References

1. J. Borges, “MIBEL and the Market Splitting - 5th International Conference on the European electricity market,” in 2008 5th International Conference on the European Electricity Market, 2008.
2. Homepage OMIE, “Mercado Diário.” [Online]. Available: http://www.omie.es/pt/principal/mercados-e-produtos/mercado-da-electricidade/os-nossos-mercados-de-eletricidade/mercado-di. [Accessed: 05-Feb-2018].
3. R. F. da C. Moreira, “Previsão Probabilística dos Preços de Energia Elétrica do Mercado Ibérico de Eletricidade,” 2015.
4. Homepage EUROSTAT, “Cooling and heating degree days by country - monthly data.” [Online]. Available: http://ec.europa.eu/eurostat/web/products-datasets/product?code=nrg_chdd_m. [Accessed: 15-May-2018].
5. Homepage ERSE, “Índice de Produtibilidade Hidroeléctrica (IPH).” [Online]. Available:http://www.erse.pt/pt/glossario/Paginas/glossario.aspx?folder=23324d4f-8a61-4074-a170-6f8373f1827e&master=ErsePrint.master. [Accessed: 15-May-2018].
6. Homepage INEPT, “Índice de Produtividade Industrial” [Online]. Available: https://www.ine.pt/xpotal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine_indicadores&indOcorrCod=0009411&contexto=bd&selTab=tab2. [Accessed: 15-Jun-2018].
7. C. Cristina, E. Maciel, P. Guimaraes, and J. C. Ribeiro, Instrumentos estatísticos de apoio à economia. Lisboa, 2000.
8. N. S. M. dos Santos and P. O. Fernandes, “Modelação da procura turística em Portugal,” Rev. Tur. Desenvolv., 2012.
9. D. N. Gujarati and D. C. Porter: Essentials of Econometrics. McGraw Hill (2010).
10. Homepage INEES, “Índice de Produtividade Industrial.” [Online]. Available: http://www.ine.es/jaxiT3/Datos.htm?t=26061. [Accessed: 05-May-2018].
11. D. Gujarati. Econometrics by example. UK: Palgrave Macmillan. 2015.
12. H. White, “A Heteroskedasticity-Consistent Covariance Matrix Estimator and a Direct Test for Heteroskedasticity,” Econometrica, 1980.
13. M. Verbeek. A Guide to Modern Econometrics. UK: A John Wiley & Sons. 2012.
14. Homepage Rede Elétrica Espanha, “National statistical series.” [Online]. Available: http://www.ree.es/en/statistical-data-of-spanish-electrical-system/statistical-series/national-statistical-series. [Accessed: 05-May-2018].
15. Homepage Rede Elétrica Nacional, “Estatística Mensal - SEN” [Online]. Available: http://www.centrodeinformacao.ren.pt/PT/InformacaoExploracao/Paginas/EstatisticaMensal.aspx. [Accessed: 05-Feb-2018].
16. Homepage INEES, “Indice de Produtividade Industrial.” [Online]. Available: http://www.ine.es/jaxiT3/Datos.htm?t=26061. [Accessed: 05-May-2018].

A New Model for Short-Term Load Forecasting in an Industrial Park

Luis Hernández Callejo[1[0000-0002-8822-2948]], Angel García-Pedrero[1 [0000-0002-6848-481X]] and Víctor Alonso[1[0000-0001-5107-4892]]

[1] Universidad de Valladolid, Campus Universitario Duques de Soria, Soria (Spain)
luis.hernandez.callejo@uva.es; angelmario.garcia@uva.es; victor.alonso.gomez@uva.es

Abstract. Nowadays, industrial parks are seen as spaces for the integration of demand and electricity generation. The proximity of the industrial parks to the Smart City, makes possible the employment of advanced techniques for the prediction of the demand and electric generation. This paper presents a complete experiment to choose a model of Short-Term Load Forecasting in industrial parks. The models used are based on artificial intelligence, and different input variables have been tested on all models.

Keywords: Short-Term Load Forecasting, Industrial Park, Artificial Intelligence, Smart City.

1 Introduction

In recent times, the technological advances applied to cities and their surroundings have led to the Smart City concept. The sustainability of cities and their surroundings is one of the main interests at present [1].

As shown in [2], one of the important pillars of Smart City is energy, but this area is expanded thanks to the Smart Energy Systems concept (electricity, heating, cooling, industry, buildings and transportation). In other words, the electrification of cities and their surrounding areas is critical for the development of a society, as it appears in [3].

One of the areas close to the city with the most electricity consumption is an industrial park. These integrate a variety of industrial sectors with a very different consumption behavior. Despite new paradigms such as eco-industrial parks [4], these scenarios are in need of electrical power, and in some cases elevated.

In addition to the above, the current trend towards the integration of renewable generation sources in cities must be taken into account. This integration will be in: Smart Buildings [5], microgrids [5, 6] and industrial parks [7, 8].

In these scenarios, an industrial park is considered a microgrid, since it has distributed generation, distributed storage and loads. An emerging actor in an industrial park will be the aggregator, whose responsibility is to adjust generation to demand [9]. In order to achieve a balance of power, it is necessary to have forecasting tools, for generation and demand. Specifically, in order to operate distributed storage, it is necessary to have short-term forecasting tools, and in the case of demand, Short-Term Load Forecasting (STLF) tools.

As it appears in [10], the forecast of the demand is already a very old challenge. These authors also show the need for new models applied to disaggregated environments, such as microgrids, industrial parks or Smart Buildings. Another of the conclusions obtained is that the models most used in the last two decades are those based on Artificial Intelligence (AI).
With respect to models based on AI for STLF in microgrids, the works found are numerous and varied. The authors in [11] present a one-stage model, where they use a Multi-Layer Perceptron (MLP), which is a model based on Artificial Neural Network (ANN). Following the ANN, other authors use two stages to finalize the prediction [12, 13].
Regardless of the chosen model, for the prediction of electrical demand it is fundamental to choose the input variables to the model correctly. Some authors focus their efforts on locating the climatic variables that most relate to the electrical demand [14]. However, other authors [15] focus their attention on the climatic variables, but also on the relationship itself with previous values of the electricity demand.
Therefore, this work presents a new model for STLF in a real industrial park. There have been numerous experiments, with several models based on AI, each of which has been tested with input variables that have been increasing in number. The final results have been satisfactory and the model obtained has a high efficiency.
The work is structured as follows. In Section 2 the data used are presented as well as the methodology used. Section 3 shows the results of the experiments. In Section 4 the results are discussed to conclude with some conclusions and future works.

2 Data and Methods

2.1 Data description

In order to carry out this work, it was necessary to have data from a real location. The Spanish electricity company Iberdrola has provided the data to be able to do the experiment. Specifically, the data is from an industrial park located in Burgos (Spain), called “Gamonal”.
The data of Iberdrola are those corresponding to the power consumption of the industrial park. The company has provided a total of 4 years. Figure 1 shows the power demand along time during the complete time under study. In order to facilitate the visualization of the data, they have been aggregated on a daily basis. Therefore, the available data set has the following information: day, month, year, 24 values of electricity demand, as well as the maximum, average and minimum temperature. These data of the electric company have been completed with the variable that indicates whether the day is workable or not.

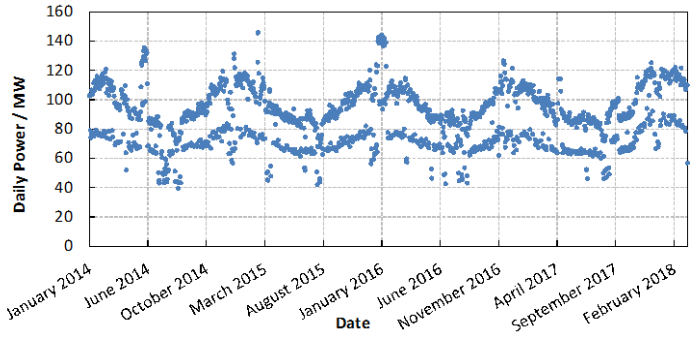


Fig. 1. Daily power demand from January of 2014 to March of 2018.

2.2 Methodology

The ability of four types of algorithms to predict the next day's hourly power demand was evaluated:

- Decision Tree Regression (DTR) [16];
- Multi-Layer Perceptron Regressor [17] with three activation functions which are ReLu (MLP_{ReLu}), Logistic ($MLP_{Logistic}$), and hyperbolic tan (MLP_{tanh});
- Support Vector Regressor [18] with three kernels which are Linear (SVR_{Linear}), Polynomial ($SVR_{Polynomial}$), and Radial Basis Function (SVR_{RBF}); and
- Gradient Boosting Trees [19] for three types of regressions which are Linear ($XGBR_{Linear}$), Gamma ($XGBR_{Gamma}$), and Tweedie ($XGBR_{Tweedie}$).

To determine the predictive capacity of the aforementioned methods, different experiments were carried out. Each experiment corresponds to different combinations of features which serve as input to these methods. The different combinations are described in Table 1.

Table 1. Features used in each experiment.

Features	Experiments						
	0	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
24 hourly electricity demand values for the current day	■	■	■	■	■	■	■
Is the current day a working day? [0,1]		■	■	■	■	■	■
Is the next day a working day? [0,1]			■	■	■	■	■
Weekday of the current day [1-7]			■	■	■	■	■
Weekday of the next day [1-7]			■	■	■	■	■
Minimum temperature of the current day						■	■
Maximum temperature of the current day						■	■
Average temperature of the current day						■	■
Minimum temperature of the next day							■
Maximum temperature of the next day							■
Average temperature of the next day							■

A minimum data cleaning was applied to the data set. Thus records with values equal to zero, and series with constant values were eliminated. The first three years were used for training while the last one was used to test the models. Training data was standardized by removing the mean and scaling to unit variance. During the training phase, a 3-fold cross validation was used to obtain the best parameter setting for each model. The criteria used to establish the best model was to minimize the Mean Squared Error (MSE).
All experiments were carried out in Python using the Scikit-learn framework [20].
In order to evaluate the performance of each methods during the forecasting of the electrical power demand, the Mean Absolute Percentage Error (MAPE) was used. The MAPE is defined as follows:

$$MAPE = \frac{100\%}{n} \sum_{t=1}^{n} \left| \frac{A_t - F_t}{A_t} \right| \quad (1)$$

where A_t is the actual value, F_t is the predicted value, and n is the total of observation in time series.

3 Results and Discussion

The results expressed in MAPE of all experiments are shown in Figure 2. Logically, the MAPE is greater on those hours which have more standard deviation and lower on those with less standard deviation. It can also be seen that for some methods, like SVRLinear, MLPtanh and, especially, $XGBR_{Gamma}$, the dependence of the experiment assumptions for training the network is not very significant. On the other hand, other methods, like MLP_{ReLu}, $XGBR_{Linear}$ and $XGBR_{Tweedie}$ are very sensible to those kind of information. As the shape of all graphs is smooth and consistent, it is possible to leave just the best experiment (or experiments if they are nearly) in each of the method for a better comparison between them. Due to that, it is also possible to average the daily error, probed that all the methods have maximums and minimums at similar time intervals.
Figure 3 shows the daily average of the hourly MAPE values displayed in Figure 2 for all methods and experiments. In Figure 4, worse methods have been removed for each experiment, i.e. $SVR_{Polynomial}$, DTR, MLP_{tanh} and $XGBR_{Gamma}$. There clearly can be seen that experiments 3 to 6 has obtained better results than 0 to 2 so, finally, in Figure 5, just the experiments and methods which have obtained significantly better results than the rest, are shown. These three methods, MLP_{Relu}, $XGBR_{Linear}$ and $XGBR_{Tweedie}$, are the best for our dataset. Additional studies over other similar datasets are necessary to conclude if they are significantly better always or just in this case. Moreover, if the results crown them as always the best, it would be interesting to look inside their basics and find if there is some logical reason in order to extrapolate this conclusion over a more general dataset of energetic demand as residential or heavy industrial scenarios.

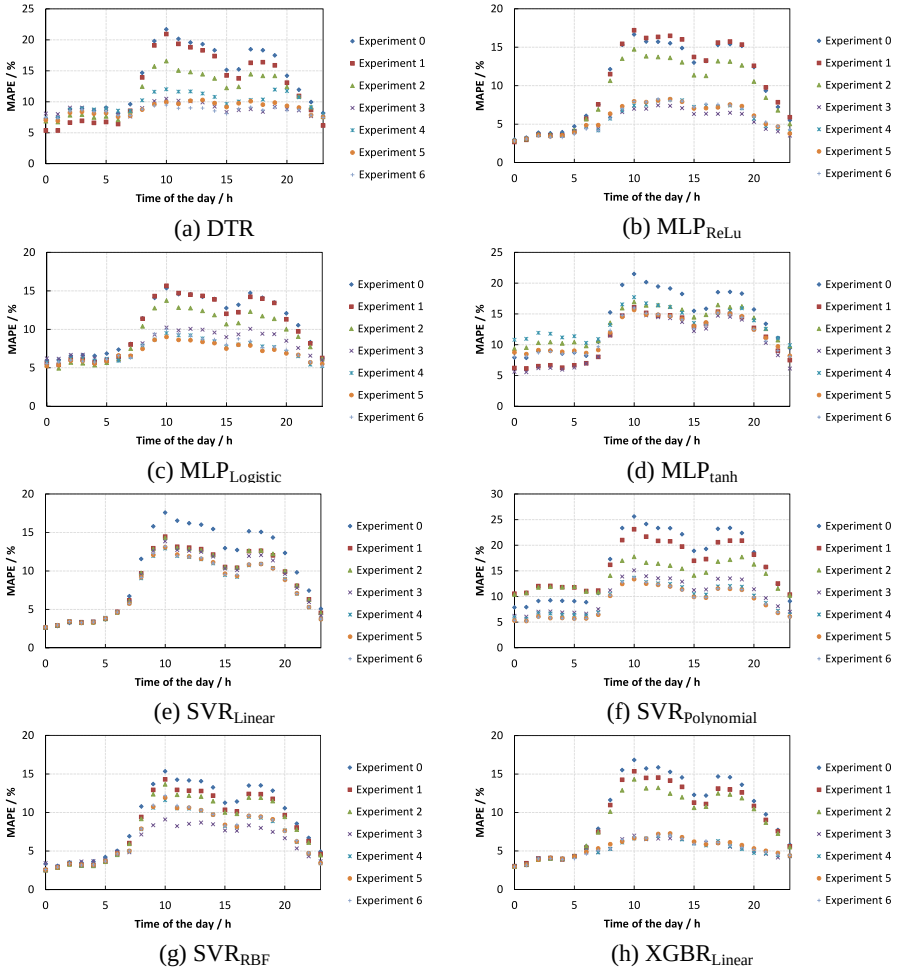


Fig. 2. Hourly MAPE results of each experiment trained in each of the methods used.

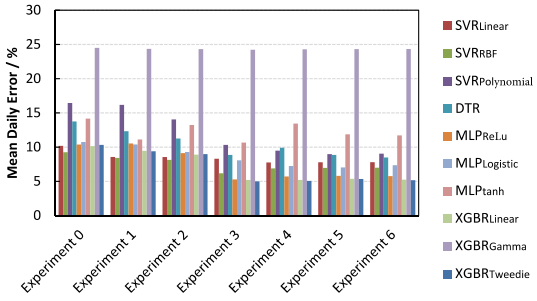


Fig. 3. Mean daily error (in percentage) for all methods and experiments.

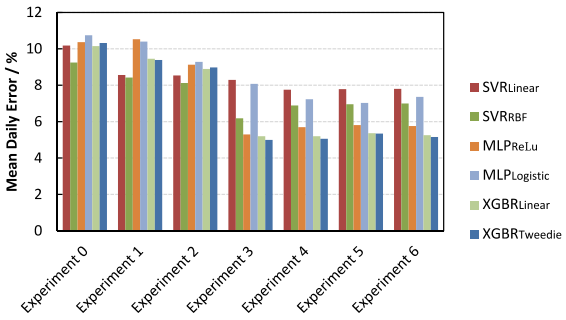


Fig. 4. Mean daily error (in percentage) excluding worse methods.

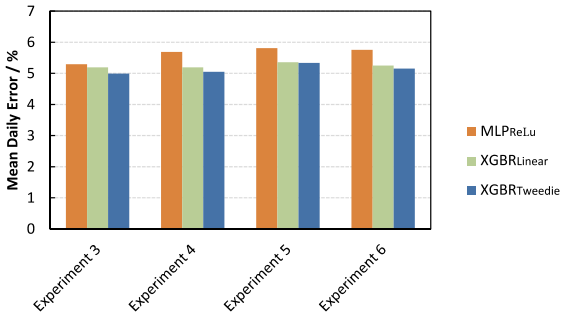


Fig. 5. Mean daily error (in percentage) including only the best experiments and methods.

Finally, in Figure 6-8 the hourly MAPE of these three methods are shown. As can be seen, in Figure 6 there is just one experiment while in Figures 7 and 8, there are three or four. The reason is that only the bests experiments have been kept and for the XGBR methods, the difference between some of the experiments is almost negligible. Anyway, the conclusion of our study is that without previous classification of data and no complex assumptions, we have obtained predictions with less than an 8% error over the real power necessities anytime. And all these finally selected models have between 3% and 5% of error over 10 hours of the 24 of the day. This can seem not very accurate, but taking into account that the standard deviation of the mean consumption for each hour goes from 11% to 25%, it is a very good result. Even more if we think that this precision probably cannot be achieved by an experienced human without a lot of hours of effort and that, this technique, can be automatized (and retrained if it is needed) with much less effort and cost. It would be interesting for future works study if a clusterization of data previously to the training gives better results and which kind of patterns is able to detect which, surely, we have not took into account.

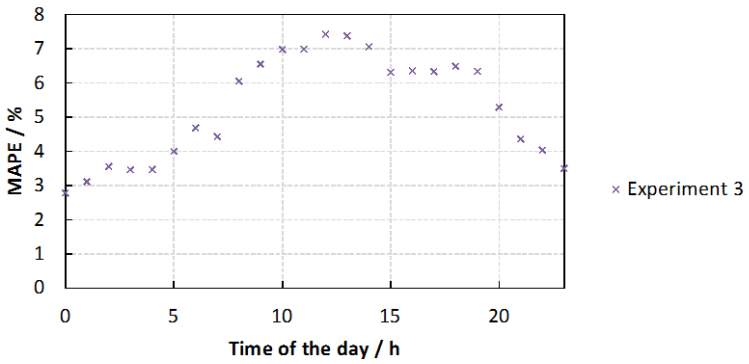


Fig. 6. MAPE (%) obtained by MLP_{ReLu} in Experiment 3

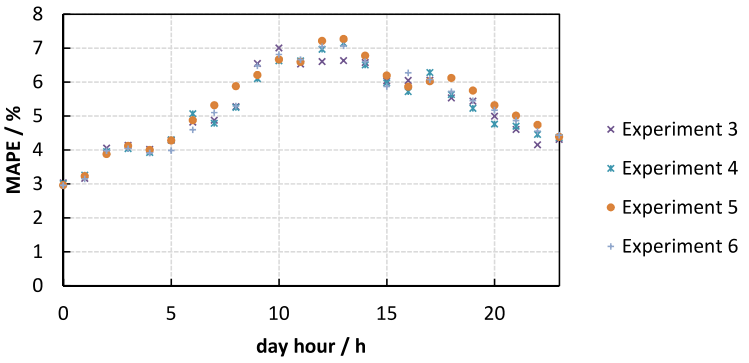


Fig. 7. MAPE (%) obtained by $XGBR_{Linear}$ in Experiments 3, 4, 5, and 6.

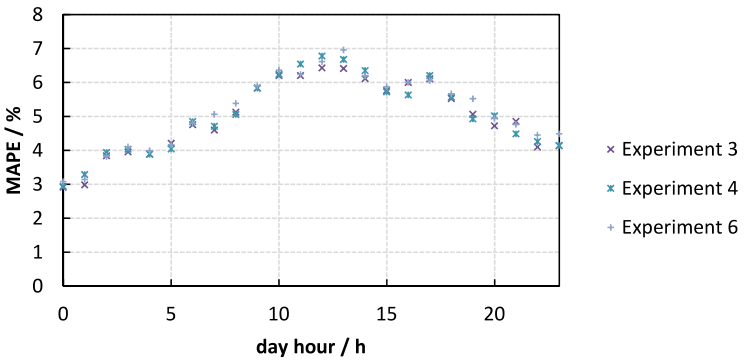


Fig. 8. MAPE (%) obtained by $XGBR_{Tweedie}$ in Experiments 3, 4, and 6.

4 Conclusions

The integration of renewable energy sources in cities is a reality. The city, like the microgrids, will be scenarios where electricity consumption and generation must co-exist. In these new scenarios new figures emerge, such as the aggregator. The main function of the aggregator will be to manage and control the demand and the existing generation. The Smart City, an environment that combines consumption and generation, is an operating scenario for these aggregators.

In this sense, the industrial parks are places with demand and generation, for which the agergadores will have to manage them in the best possible way. These industrial parks will be part of the Smart City, so their integration should be a main objective.

Therefore, aggregators and/or microgrid managers (Smart Cities, Industrial Parks, etc.) will need forecasting tools, both demand and generation.

New models of electric demand prediction must be tested and validated (for industrial parks). In this sense, this work has shown that AI-based models are of great interest and their effectiveness is high. The work shows the results of a group of models to make STLF, and the results have been presented. In addition, the work demonstrates the need to have interesting variables to solve the problem, so that the models have been tested for different input variables (experiment).

The authors will continue to work on finding better solutions for prediction in these environments. The application of climatic variables to improve the problem is a next step, and then use clustering tools.

References

1. George Cristian Lazaroiu and Mariacristina Roscia. Definition methodology for the smart cities model. Energy, 47(1):326–332, 2012.
2. Henrik Lund, Poul Alberg Østergaard, David Connolly, and Brian Vad Mathiesen. Smart energy and smart energy systems. Energy, 137:556–565, 2017.
3. Alexander Anderson, Paras Loomba, Ifeanyi Orajaka, Jude Numfor, Shammya Saha, Samantha Janko, Nathan Johnson, Robin Podmore, and Ray Larsen. Empowering smart communities: Electrification, education, and sustainable entrepreneurship in IEEE smart village initiatives. IEEE Electrification Magazine, 5(2):6–16, 2017.
4. Antonio Valero, Sergio Usón, César Torres, Alicia Valero, Andrés Agudelo, and Jorge Costa. Thermoeconomic tools for the analysis of eco-industrial parks. Energy, 62:62–72, 2013.
5. G De Luca, S Fabozzi, N Massarotti, and L Vanoli. A renewable energy system for a nearly zero greenhouse city: Case study of a small city in southern Italy. Energy, 143:347–362, 2018.
6. Jorge Mirez, Luis Hernandez-Callejo, Manfred Horn, and Luis-Miguel Bonilla. Simulation of direct current microgrid and study of power and battery charge/discharge management. DYNA, 92(6):673–679, 2017.
7. Jonas Timmerman, Lieven Vandevelde, and Greet Van Eetvelde. Towards low carbon business park energy systems: Classification of techno-economic energy models. Energy, 75:68–80, 2014.

8. Dae-Geun Jin, Jong-Chan Choi, Dong-Jun Won, Hak-Ju Lee, Woo-Kyu Chae, and Jung-Sung Park. A practical protection coordination strategy applied to secondary and facility microgrids. Energies, 5(9):3248–3265, 2012.
9. Lazaros Gkatzikis, Iordanis Koutsopoulos, and Theodoros Salonidis. The role of aggregators in smart grid demand response markets. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 31(7):1247–1257, 2013.
10. Luis Hernandez, Carlos Baladron, Javier M Aguiar, Belén Carro, Antonio J Sanchez-Esguevillas, Jaime Lloret, and Joaquim Massana. A survey on electric power demand forecasting: future trends in smart grids, microgrids and smart buildings. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 16(3):1460–1495, 2014.
11. Luis Hernández, Carlos Baladrón, Javier M Aguiar, Lorena Calavia, Belén Carro, Antonio Sánchez-Esguevillas, Francisco Pérez, Ángel Fernández, and Jaime Lloret. Artificial neural network for short-term load forecasting in distribution systems. Energies, 7(3):1576–1598, 2014.
12. Nima Amjady, Farshid Keynia, and Hamidreza Zareipour. Short-term load forecast of microgrids by a new bilevel prediction strategy. IEEE Transactions on smart grid, 1(3):286–294, 2010.
13. Luis Hernández, Carlos Baladrón, Javier M Aguiar, Belén Carro, and Antonio Sánchez-Esguevillas. Classification and clustering of electricity demand patterns in industrial parks. Energies, 5(12):5215–5228, 2012.
14. Dao Hoang Vu, Kashem M Muttaqi, and AP Agalgaonkar. A variance inflation factor and backward elimination based robust regression model for forecasting monthly electricity demand using climatic variables. Applied Energy, 140:385–394, 2015.
15. Luis Hernández, Carlos Baladrón, Javier M Aguiar, Lorena Calavia, Belén Carro, Antonio Sánchez-Esguevillas, Pablo García, and Jaime Lloret. Experimental analysis of the input variables relevance's to forecast next day's aggregated electric demand using neural networks. Energies, 6(6):2927–2948, 2013.
16. Breiman Leo, Jerome H Friedman, Richard A Olshen, and Charles J Stone. Classification and regression trees. Wadsworth International Group, 1984.
17. David E Rumelhart, Geoffrey E Hinton, and Ronald J Williams. Learning representations by back-propagating errors. Nature, 323(6088):533, 1986.
18. Vladimir Vapnik. The nature of statistical learning theory. Springer science & business media, 2013.
19. Jerome H Friedman. Greedy function approximation: a gradient boosting machine. Annals of statistics, pages 1189–1232, 2001.
20. F. Pedregosa, G. Varoquaux, A. Gramfort, V. Michel, B. Thirion, O. Grisel, M. Blondel, P. Prettenhofer, R. Weiss, V. Dubourg, J. Vanderplas, A. Passos, D. Cournapeau, M. Brucher, M. Perrot, and E. Duchesnay. Scikit-learn: Machine learning in Python. Journal of Machine Learning Research, 12:2825–2830, 2011.

Services of energy storage technologies in renewable-based power systems

Francisco Díaz-González[1], Eduard Bullich-Massagué[1], Cristina Vitale[1], Marina Gil-Sánchez[1], Mònica Aragüés-Peñalba[1], and Francesc Girbau-Llistuella[1]

Centre d'Innovació Tecnològica en Convertidors Estàtics i Accionaments (CITCEA-UPC), Universitat Politècnica de Catalunya ETS d'Enginyeria Industrial de Barcelona, C. Avinguda Diagonal, 647, Pl. 2, 08028 Barcelona, Spain,
francisco.diaz-gonzalez@upc.edu

Abstract. Due to the vast deployment from distributed to large-scale renewable generation, electrical power systems are being equipped more and more with tools improving the controllability of power flows and state monitoring and prospective. In this regard, future power networks are evolving into smart grids. One of the tools for the modernization and decarbonization of power networks is the field of Energy Storage Systems (ESSs). This paper proposes a classification for the many services the ESSs can provide in power systems dominated by renewable-based generation. Three categories of services are defined in terms of the power and energy ratings of the ESS and the main type of beneficiary in each case. For each service, the most suitable type of ESS is identified, exemplary projects are noted and key regulatory issues are highlighted.

Keywords: Smart grids, energy storage, renewable-based power plants.

1 Introduction

Electrical power systems are holding an increasing penetration of renewable-based generation. The intrinsic variability of wind-based and photovoltaic systems –integrated at large scale and also at the consumer level– impose diverse challenges for the planning and the operation of future power networks, e.g. the achievement of the required balance between generation and demand at all time, and the security of supply to customers. To do so, power networks should be equipped with new tools in many technological areas to improve controllability of power flows and the state monitoring and prospective. In this regard, future power networks are evolving into smart grids [1].

One of the tools for the realization of smart grids is the field of ESSs. ESSs can effectively be controlled so as to integrate renewables at the different scale levels, from the customer domain to the large-scale level, thus facilitating a transition to a decarbonized power system and society in general.

The ESSs can provide numerous services in power systems with high penetration of renewable generation. The present paper presents a classification of

such services, contributing to the various approaches proposed in literature [2–4]. In the present paper, services are distributed in three main categories. Each category is defined by the power and energy ratings of the ESS to manage, as well as by the main type of beneficiary of such services. The first category is the one involving so-called small-scale ESS (see Figure 1). In here, relatively small storages in power and energy ratings mainly enable the active participation of individuals, domestic end users, in electricity markets. Thus, keywords such as self-consumption and off-grid operation (energy independency) come into play here. Then, the second category is characterized by involving mid-size ESS, reaching up to few MW in power and few MWh in energy storage capacity. Services related here refer to the management of relatively important amount of power, flowing through distribution systems. Thus, the main beneficiaries here are the actors in the distribution domain (i.e. distribution system operators (DSO)). Finally, the third category of services is the one involving large-scale ESSs. Here, bulk energy storage capacity is required to enable the integration of large renewable-based power plants in power systems and related markets. Keywords such as system ancillary services and generation time-shifting are ad-

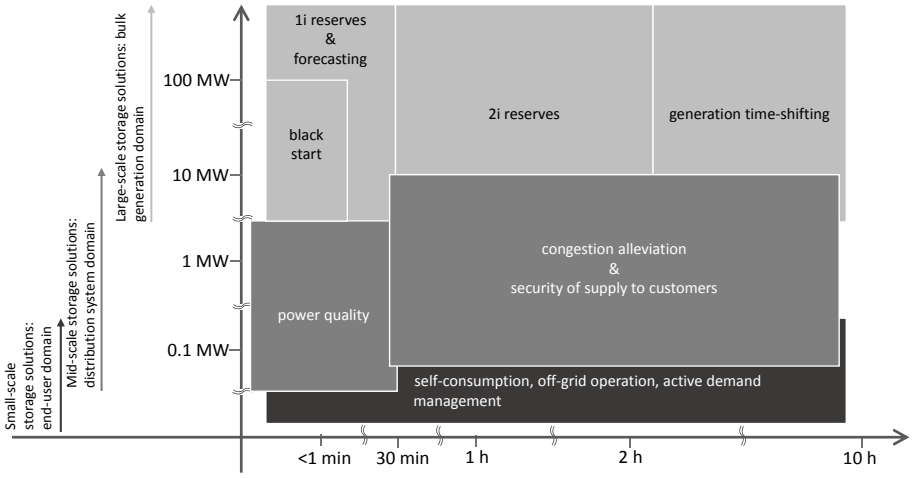


Fig. 1. Catalog of services for energy storage systems in renewable-dominated power systems.

Following sections describe each of the services in Figure 1, highlighting the suitable energy storage technologies, representative projects and related regulatory issues.

2 Small-scale energy storage solutions: the end-user domain

Small-scale energy storage can be used to improve the self-consumption performance and to provide services to the end user. In this case, the storage device is installed at local residences or small facilities such as town-hall, municipal sports center, etc. Below, the different services that small-scale energy storage technologies can provide are explained.

2.1 Services: self-consumption, off-grid operation and active demand management

Self-consumption. Local small installations commonly present variable consumption profiles. When renewable energy production is installed in these sites, during some periods the electrical production will be higher than the consumption and vice-versa. When the local generation is higher than the consumption, the excess have to be injected to the grid (or wasted, losing efficiency). Contrarily, when the energy production is lower than the consumption, the end-user needs to buy electricity from the grid. Small energy storage devices can mitigate this effect, storing energy when there is excess production and delivering it when there is a lack of production.

Off-grid operation. Commonly, it is desirable to be connected to the main distribution network. Nevertheless, any fault on the system can produce an outage of this network, which can last several minutes, hours or even days. In this case, energy storage devices, combined with other generation sources such as photovoltaic, diesel engines, and etcetera, can help the operation in islanded (or off-grid) mode.

Active demand management. Small-scale storage devices could manage the load demand by storing or injecting active power according to the electricity price signals. In essence, it consist on increasing the total load (store energy) during low electricity price periods, and reducing it (supply energy) during high price periods. On the other hand, batteries from electrical vehicles can also buy the electricity during low price periods or when there is excess of production from local generation.

2.2 Suitable technologies and representative projects

The small-scale storage devices should be sized considering the local consumption profiles, the local generation profiles (if exist) and the desired service. Nevertheless, the size of these systems are in the scale of few kW to hundreds of kW in power and of few tens of kWh to hundreds of kWh (for community scale installations). The suitable energy storage technologies for this application are mainly secondary batteries. Lead-acid ones have dominated the market for decades because of their commercial availability and low cost, while Lithium-ion and flow batteries are gaining momentum progressively [5, 6].

Table 1 lists exemplary projects around the application of small-scale energy storages for the services discussed above.

Table 1. Small-scale energy storage examples

Project	Loc.	Size	Tech.	Description	Status	Ref.
ENDESA HQ B2G	Spain	20 kW 20 kWh	Li-ion	Install batteries close to EV charging points and on-site renewable generation. Uses: electric energy time shift, load following, on-site renewable generation shifting	ON dec 2013	[7]
Duke Energy Charlotte	US	6 kW 11.5 kWh	Li-ion	Residential energy storage in combined with local solar power generation. Uses: Renewable energy time shift, back-up power supply.	ON dec 2013	[8]
NRECA/ CRN	US	4.6 kW 11.8 kWh	Lead-acid	Storage installed at utility office building. Uses: demand charge reduction, back-up power supply, electric energy time shift.	ON aug 2013	[9]
PVCROPS	Portugal	5 kW 60 kWh	Flow	Demonstration project: Develop control strategies to store energy in building integrated PV installations. Uses: renewable capacity firming, renewable energy time-shift.	ON oct 2013	[10]

2.3 Snapshot on regulatory issues

One of the main barriers for further integration of small-scale energy storage technologies is the regulation. For example, in the case of Spain, self-consumption regulation changes are continuously announced each time the political party that governs changes. This leads to uncertainty, turning the investments in self-consumption installations unattractive to the end user. Currently, the European Union is trying to encourage countries to develop regulatory frameworks that incentives the self-consumption installations. This is, in fact, one of the hot topics for the transition towards a decarbonized energy sector [11].

3 Mid-scale energy storage solutions: the distribution system domain

Mid-scale energy storage solutions will enable the distributed generation and electrical vehicle integration. These mid-solutions are designed to be deployed along the low and medium voltage networks. They may provide diverse services to the grid operator and end users. The most representative mid-scale services are described in the following.

3.1 Services: power quality improvement, congestion alleviation and security of supply

Power quality improvement. A power system with a high number of renewable sources and non-linear and non-resistive consumptions (such as electrical vehicles, LED lighting solutions, among others) might increase electrical losses and lead to voltage variations. The causes can be diverse, but the most usual are directly related to the presence of harmonic and reactive currents, unbalances and reverse power flows. A suitable mid-scale storage system may revert

this situation balancing power flows, canceling current harmonics and reactive currents, reducing the voltage variability through active power injection, etc.

In practice, the storage solution collects data from the field continuously quantifying power quality issues. Then, it corrects them compensating reactive power and current harmonics, as well as balancing downstream consumptions. Additionally, it is able to inject or consume active / reactive power according to predefined droops in order to regulate the voltage at its point of common coupling.

Based on experience, it can be estimated that the power ratings for the storage solution so as to provide the above services should reach up to 66% of maximum power flow at its connection point, e.g. at a secondary substation feeding a neighborhood [12]. To provide the services above, energy storage is in fact not strictly needed, but are the power capabilities of the associated power electronics what determines the performance of the storage solution. However, having some energy storage can be beneficial for also exchanging active power with the grid for voltage control purposes in networks with relatively important resistive behavior (e.g. rural grids).

Congestion alleviation in weak grids. Power systems with a high number of renewable sources and high power demand may experience critical situations such as congestions. Suitable storage systems may revert this situation charging and discharging energy when needed. Dedicated management with certain forecasting capability is required to do so. Forecast could be performed based on historic data on power flows, calendar and weather data, among others. Based on this, the schedule for the storage can be solved.

Security of supply for customers at district or neighborhood level. The reliability of a network can be measured by the average number and duration of supply interruptions [13]. According to [14], a supply interruption is "a condition in which the voltage at the supply terminals is lower than 1% of the declared nominal voltage of the system". There are two types of supply interruptions: prearranged interruptions, that can be due to planned maintenance works of a part of the network and accidental interruptions, usually caused by a fault of different natures (external event, equipment failures or interferences).

Distributor System Operators (DSOs) are encouraged to increase the reliability of the grid they operate through incentives and penalties. For this purpose, standards entail the continuity of supply and set specific limits based on maximum duration and frequency of the interruptions, imposing penalties if the requirements are not fulfilled [13].

In this context, energy storage systems can play a key role for enhancing the security of supply for customers (enabling shorter or less frequent interruptions) and leading to economic savings for the DSO. One strategy to ensure the continuity of supply is through the so-called "network reconfiguration".

The grid is reconfigured by bypassing the fault that is creating the interruption. The DSO can utilize the sensing distributed infrastructure to localize the fault and then calculate the new grid arrangement to redirect the power flow. Controlled islanding can be created (intentionally) in order to keep supplying

the customers that got isolated from the main grid. When islanding is planned, a schedule for power management should be provided to ensure adequate balancing, coordinating all the network equipment.

The energy storage system will receive the appropriate signals from the management system of the DSO to provide an optimal and secure schedule of the island operation, utilizing the energy forecast, grid configuration information and status of the monitored grid elements.

3.2 Suitable technologies and representative projects

The power rating and energy capacity of the energy storage system will depend on the type of customers willing to profit from these service, which could be connected either to LV or MV networks. The power rating of the power electronic equipment will be in the range of a few tens kW to few MW. The energy storage capacity will depend on the interruption time allowed in the installation and is in the range of tens of kWh to few MWh and this depends on the time a grid congestion occurs and its severity, for instance.

So the most suitable storage technologies for mid-scale energy storage solutions for the above explained services are secondary batteries and flow batteries. Specifically, Lithium-ion and Lead-acid batteries are being widely employed. Lithium-ion batteries offer large energy density for their size, fast charging/discharging and long lifetime, compared to Lead-acid batteries. However, the latter are less expensive. Also for services related to power quality improvement, energy storages with very short time response and large cyclability may be needed. In this sense, not batteries but supercapacitors and flywheels are best addressed [2].

See representative examples of projects adopting mid-scale ESSs in Table 2 .

Table 2. Mid-scale energy storage examples

Project	Loc.	Size	Tech.	Description	Status	Ref.
Nice grid	France	250 kW 479 kWh	Li-ion	Develop a smart grid that integrates solar panels, energy storage batteries and smart meters. Uses: microgrid capability, on-site renewable generation shifting, grid upgrade deferral	ON sep 2013	[15]
Horse Island Microgrid	UK	12 kW 60 kWh	Lead-acid	Reduce residents reliance on their two diesel generators. Uses: electric supply capacity, microgrid capability, on-site renewable generation shifting	ON aug 2009	[16]
Smart Rural Grid	Spain	40 kW 40 kWh	Li-ion	Develop a smart grid that integrates distributed generation, power electronics and storage in rural grids. Uses: Power quality improvement, microgrid capability, on-site renewable generation shifting	ON sep 2017	[12]
Trolleybus facility	Germany	5 kW 5.7 kWh	Li-ion Supercap.	Fully static supercapacitor-based storage technology installed in Cologne. Uses: Compensation of resistive voltage drops in transportation networks	ON sep 2017	[17]

3.3 Snapshot on regulatory issues

The separation of activities for the different agents in the electrical sector in Europe is mandatory, as stated in the Directive 2003/54/Eg [18]. This Directive establishes that the operation and ownership of electrical grids should be fully regulated: there should not be competence here. In turn, these activities should be separated from those concerning generation and commercialization to customers, which functioning should be based on competitive market-based rules.

So at the end, and in regard of energy storage, it can be deduced that a DSO could not participate in markets managing an energy storage device. This is in fact explicited in the European Directive 2009/72/Ec [19]. This Directive forbids distributors –and the operators of the transmission networks also– to own and operate generating assets. By generating assets one can also intend energy storages, but this word did not even appear in the Directive in 2009.

Nowadays, it is hard for a DSO to take advantage of managing energy storage systems. Anyhow, research is focused on identifying the benefits of doing so and, respecting the requirements of the regulation, the applications aimed for such energy storages are not related with the electricity market, but with the improvement of the quality of service the DSO offers to its customers instead (e.g. power quality issues, reduction of interruptions of supply, etc.)

4 Large-scale energy storage solutions: the bulk generation domain

Large-scale energy storage solutions enable the integration of bulk renewable generation. The most representative large-scale services are described in the following.

4.1 Services: grid ancillary services, enhancement of generation controllability

Grid ancillary services: primary and secondary power reserves, voltage control, power ramp-rate limitation and black start capability. The variability of renewables impacts on required power reserves in the network. Such reserves are needed to ensure the required balance between generation and demand at all time. Energy storage can be a provider of such power reserves in the different time frames, i.e. the so-called primary and secondary reserves [20]. They also can contribute to the grid integration of renewables by providing the services of black start support and voltage control. These services in the frame of renewables integration are known as grid ancillary services and are described in the following.

Primary reserves refers to the so-called primary frequency control. Primary reserves from a generator group represents the ability of its system to modify its current active power in-feed to the grid in a short period of time (seconds to

minutes). It can be either generation increase or decrease depending on the grid frequency fluctuation, this way, the frequency perturbations in the grid due to unbalances in the power supplied can be balanced. It can be achieved by a droop control (power output / frequency function) as can be deduced from Figure 2.

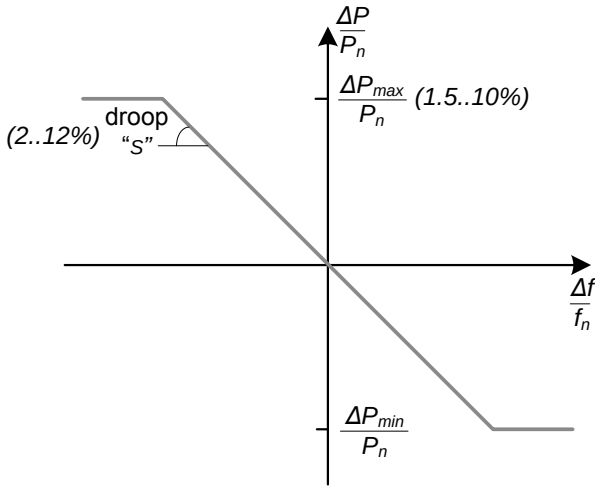


Fig. 2. Power-frequency droop characteristic for primary frequency control according to EU network code [21].

The next control to be taken is the one activating secondary reserves. Secondary reserves progressively replaces primary reserves (and this process takes from minutes to hours) to be available for future grid imbalances; it maintains the generation-demand balance previously supported by inertia and primary reserve and it initiates the process of restoring the frequency level back to the nominal value, i.e. 50Hz in Europe.

Along with the provision of primary and secondary reserves, energy storage can provide renewables with black start capability. This is the first step in the process of system restoration in the unlikely event of a black-out. This service is supplied by local power plants that have the capability to start up its main generator(s) and carry out initial energization of sections of the electricity transmission system and distribution network.

Further even, ESSs can also provide the service of power ramp-rate limitation in renewable-based power plants. This is a service being progressively introduced in grid codes. The idea here is to smooth out fast power fluctuations of PV and wind power plants for a better grid integration. Some exemplary studies by the authors of the present work can be found in [24], [23] and [22].

Finally, energy storage, since connected to the grid through fully controlled power electronics can facilitate the task of voltage control by renewables. This

control is provided by generating units or static equipment capable of exchange reactive power. This requires generating equipment to measure a voltage, compare the measurement to a reference and increase/decrease the reactive power flow out of the generating equipment. This can be achieved changing the excitation in the field winding in a synchronous generator or changing the angle of a power inverter.

Enhancement of generation controllability (time shifting and compensation of forecasting errors for renewables). The difficult prediction nature of the energy resource may affect the electricity sale scheduled in the day-ahead market, where the producer estimates the energy generation. This prediction has to be performed as closer as possible to the real operation of the power plant, since in case of forecasting error, that is a difference between the programmed generation and the effective power consumption, the market participation profit is dramatically affected. On one hand, the producer incurs in economic penalizations imposed by the system operator, while, on the other hand, the last is forced to take relative precautions for sudden events of power output, such as allocating more energy reserves, thus increasing balancing costs. In order to encourage producers to participate into the electricity market ensuring the profitability provided by this service, the implementation of an energy storage system can be offered as a solution. This device, indeed, is able to provide that energy needed to balance estimation and effective power plant generation.

Apart from the forecasting error reduction, energy storage system is an appropriate technology for the field of time shifting, which involves storing energy during low price times and discharging it during high price times, maximizing the power plant income. Surplus of renewable energy generated during valley hours can be indeed stored to be used in peak hour periods, avoiding curtailments and operation of fuel-based generators, thus improving carbon footprint.

4.2 Suitable technologies and representative projects

Usual capacity requirements for the above explained services are between few MW to hundreds of MW in power, with a response operation up to diverse hours [2]. The most suitable technologies implemented for this type of service are compressed-air energy storage, pumped-hydro installations, hydrogen and secondary batteries, especially lithium-ion, lead-acid or sodium ones for systems rated at tens of MW. Flywheels, because of their easy scalability, enabling the realization of systems rated at tens of MW in power can be also suitable for these services.

See representative examples of projects adopting mid-scale ESSs in Table 3 .

4.3 Snapshot on regulatory issues

As stated in the Clean Energy for All Europeans package, the implementation of energy storage systems alone is not enough to improve the participation of renewables in the electricity market; their penetration, indeed, can be increased switching from a day-ahead programming dispatch, with maximum probability

Table 3. Large-scale energy storage examples

Project	Loc.	Size	Tech.	Description	Status	Ref.
Stephentown Spindle	New York, US	20 MW 25 MWh	Flyw.	The ESS provides frequency regulation service (primary and secondary) to the NYISO. Fast response (4 s). It is connected at 115 kV to NYSEG grid.	ON jun 2011	[25], [26]
Notrees Wind Storage	Texas, US	36 MW 24 MWh	Li-ion	ESS is located at substation and tied to the distribution side. Uses: Frequency regulation, voltage control, wind firming, curtailment mitigation.	ON jan 2013	[27], [28]
Jeju SmartGrid Jocheon	South Korea	4 MW 8 MWh	Li-ion	The ESS connected to 154 kV grid. Black start, frequency regulation, ramping, capacity firming and voltage support	ON jul 2013	[29], [30]
Tehachapi Wind ESS	California, US	8 MW 32 MWh	Li-ion	This ESS is connected to a WPP. Uses: Capacity firming, congestion alleviation, upgrade deferral and voltage support.	ON jul 2014	[31], [32]
Hydroelectric Cardos Valley	Spain	134 MW - MWh	Pumped hydro	This ESS is connected to a WPP. Uses: Capacity firming, transm. congestion alleviation, upgrade deferral and voltage support.	ON jul 2014	[33]

of incurring in prediction error (long term basis), to a short term electricity market creating an intraday approach with higher accurate predictions. So energy storage, also at bulk scale, should be exploited in synergy with other sources of flexibility of the system.

In regard of the application of energy storage in renewable-based power plants, operational rules and related control algorithms should be explored according to the previously mentioned grid codes. The applicable grid code regulation in Europe that determines the requirements for the grid connection of renewable-based power plants and the ancillary services they should provide is the European Commission Regulation 2016/631 of 14 April 2016 [21].

5 Conclusions

This paper proposed a classification for the many services the ESSs can provide in power systems dominated by renewable-based generation. Three categories of services are defined in terms of the power and energy ratings of the ESS and the main type of beneficiary. Small-scale ESSs (in the range of few kW to hundreds of kW in power and of few tens of kWh to hundreds of kWh in energy) are best intended for the provision of services to the end-user. Analogously, mid-scale ESSs (in the range of few tens kW to few MW in power and of few tens of kWh to few MWh in energy) are best intended for the provision of services to the distribution domain. For both cases (small and mid-scale ESSs) the exploitation of related businesses is bounded by remarkable regulatory issues. Finally, large-scale ESSs (in the range of few MW to hundreds of MW in power, with a response operation up to diverse hours) are primarily intended for the provision of services for bulk renewable-based power plants.

6 Acknowledgments

This work was supported by the Ministerio de Economia, Industria y Competitividad (Spanish government), under the grant agreement number ENE2017-86493-R.

References

1. Fang X, Misra S, Xue G, Yang D. (2012) Smart grid, the new and improved power grid: a survey. IEEE Commun. Surv. Tutorials, Vol. 14, No. 4, pp. 944-980
2. Díaz-González F, Sumper A, Gomis-Bellmunt O (2016). Energy Storage in Power Systems, John Wiley & Sons
3. Energy Storage Association (2000). Energy Storage, Case Studies. URL: http://energystorage.org/energy-storage/case-studies/delivering-100-commercial-reliability-aes-los-andes-battery-energy. [Accessed June 2018].
4. Zame KK, Brehm CA, Nitica AT, Richard CL, Schweitzer GD (2018) Smart grid and energy storage: Policy recommendations. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 82, pp. 1646-1654
5. Parra D, Swierczynski M, Stroe DI, et al. (2017). An interdisciplinary review of energy storage for communities: Challenges and perspectives. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 79, pp. 730-749
6. Díaz-González F, Sumper A, Gomis-Bellmunt O, Villafáfila-Robles R (2012). A review of energy storage technologies for wind power applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 16, pp. 2154-2171
7. Endesa HQ B2G project (2013). URL: https://www.endesa.com/es/proyectos/todos-los-proyectos.html. [Accessed on June 2018]
8. Duke Energy Charlotte Residential ESS (2013). URL: https://www.duke-energy.com/home. [Accessed on June 2018]
9. NRECA/CRN Distributed Energy Storage Research Project (2013). URL: https://www.smartgrid.gov/files/NRECA_DOE_Energy_Storage.pdf. [Accessed on June 2018]
10. PVCROPS Evora Demonstration Flow Battery Project - REDT (2013). URL: https://redtenergy.com/pv-crops-press-release-strong-irish-involvement-new-solar-energy-project/. [Accessed on June 2018]
11. European Commission (2016). Markets and consumers. Integrated energy markets for European households and businesses. URL: https://ec.europa.eu/energy/en/topics/markets-and-consumers. [Accessed on June 2018]
12. Girbau-Llistuella, F., Díaz-González, F., Sumper, A., Gallart-Fernández, R., Heredero-Peris, D. (2018). Smart grid architecture for rural distribution networks: application to a Spanish Pilot Network. Energies, 11(4), 844.
13. CEER (2016). 6th CEER benchmarking report on the quality of electricity and gas supply. URL: https://www.nve.no/energy-market-and-regulation/latest-news/ceer-6th-benchmarking-report-on-the-quality-of-electricity-and-gas-supply/. [Accessed on June 2018]
14. CENELEC (2006) UNE-EN 50160, European Standard, Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems.

15. NICE GRID project (2014). URL: https://www.energystorageexchange.org/projects/1599. [Accessed on June 2018]
16. Horse Island Microgrid Project - Aeolus Power (2009). URL: http://www.windandsun.co.uk/case-studies/islands-mini-grids/horse-island.aspx#.U35T1PldXXo. [Accessed on June 2018]
17. Rufer A, Hotellier D, Barrade P (2004). A supercapacitor-based energy storage substation for voltage compensation in weak transportation networks. IEEE Transactions on power delivery, Vol. 19, No. 2, pp. 629-636
18. European Commission (2003). Directive 2003/54/EC of the European Parliament and of the Council of 26 June 2003. URL: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/TXT/?uri=CELEX:32003L0054. [Accessed on June 2018]
19. Directive 2009/72/EC of the European Parliament and of the Council of 13 July 2009. URL: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=celex\%3A32009L0072. [Accessed on June 2018]
20. ENTSO-E (2009). Operational handbook; policies; load-frequency control and performance. URL: https://www.entsoe.eu. [Accessed June 2018].
21. European Commission (2016). Commission Regulation (EU) 2016/631 of 14 April 2016 establishing a network code on requirements for grid connection of generators. URL: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=OJ\%3AJOL_2016_112_R_0001. [Accessed on June 2018]
22. Cabrera-Tobar A, Bullich-Massagué E, Aragüés-Peñalba M, Gomis-Bellmunt O. (2016) Review of advanced grid requirements for the integration of large scale photovoltaic power plants in the transmission system. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 62, pp. 971-987
23. Díaz-González F, Bianchi FD, Sumper A, Gomis-Bellmunt O. (2014) Control of a flywheel energy storage system for power smoothing in wind power plants. IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 29, No. 1, pp. 204-214
24. Bullich-Massagué E, Aragüés-Peñalba M, Sumper A, Boix-Aragones O. (2017) Active power control in a hybrid PV-storage power plant for frequency support. Solar Energy, Vol. 144, pp. 49-62
25. Beacon Power LLC (2018). Operating Plants. URL: http://beaconpower.com/stephentown-new-york/. [Accessed June 2018].
26. Rockland Capital (2018). Stephentown Spindle. URL: http://www.rocklandcapital.com/portfolio/stephentown-spindle-llc/. [Accessed June 2018].
27. Ratnayake A (2011). Notrees Wind Storage Project Description. Duke Energy, URL: http://www.sandia.gov/ess/docs/pr_conferences/2011/3_Ratnayake_Notrees.pdf. [Accessed June 2018].
28. Duke Energy Coorporation (2018). Wind Energy, Notrees Battery Storage Project. URL: https://www.duke-energy.com/our-company/about-us/businesses/renewable-energy/wind-energy/notrees-battery-storage-project. [Accessed June 2018].
29. Del Castillo JM, Gun-Pyo L, Yongbeum Y and Byunghoon C (2014). Application of Frequency Regulation Control on the 4MW/8MWh Battery Energy Storage System (BESS) in Jeju Island, Republic of Korea. URL: http://ethanpublishing.com/uploadfile/2015/0106/20150106024232688.pdf. [Accessed June 2018]
30. KEPCO Smart grid and ESS Department (2014). Kepco's SG Biz Model and Strategies for Expanding. URL: http://www.nedo.go.jp/english/ired2014/program/pdf/s3/s3_5_keun-seong_kim.pdf. [Accessed June 2018].
31. Campbell D, Pinsky N (2015). Tehachapi Wind Energy Storage Project Technology Performance, Report 2. 2015. URL: https://www.smartgrid.gov/files/OE0000201_SCE_TSP_InterimRep_2016_02_12.pdf. [Accessed June 2018]

32. Kimberly N, Naum P (2015). Southern California Edison Company Tehachapi Wind Energy Storage Project. URL: https://www.smartgrid.gov/files/OE0000201_SCE_FactSheet.pdf. [Accessed June 2018]
33. Cardos Valley Hydroelectric Complex (1971). URL: http://tavascan.wixsite.com/tavascan/tavascan. [Accessed on June 2018]

Analysis and characterization of thermographic defects at the PV module level

Sara Gallardo-Saavedra[1,2] [0000-0002-2834-5591], Luis Hernádez-Callejo[1] [0000-0002-8822-2948] and Óscar Duque-Pérez[2] [0000-0003-2994-2520]

[1] Universidad de Valladolid (UVa), School of Forestry, Agronomic and Bioenergy Industry Engineering (EIFAB), Department of Agricultural and Forestry Engineering, Campus Duques de Soria, Soria 42004, Spain
[2] Universidad de Valladolid (UVa), Industrial Engineering School, Department of Electrical Engineering, Paseo del Cauce, 59, Valladolid 47011, Spain

S.G-S.: sara.gallardo@uva.es;
L.H-C.: luis.hernandez.callejo@uva.es;
O. D-P.: oscar.duque@eii.uva.es

Abstract. Cities have evolved towards a new paradigm called Smart City (SC), which must evolve towards new intelligent infrastructures, which will integrate new sensors and advanced communications. Energy efficiency is key and fundamental in the SC. The transformation of energy systems due to the increased deployment of renewable energy is occurring mostly in the electricity sector, in which recent PV numbers show an undeniable landmark in renewable energies. Being able to detect, to identify and to quantify the severity of defects that appear within modules is essential to constitute a reliable, efficient and safety system, avoiding energy losses, mismatches and safety issues, especially in case of building integrated systems, as overheated anomalies could generate a fire risk or an electrical hazard. The main objective of this paper is to perform an in-depth on-site study of 17,142 monocrystalline modules to detect every single existing defect manually, classifying them in different groups, studying the variance of the same kind of defect in different modules and the patterns of each group of thermal defects that can be used to develop a software to automatically detect if a module has an anomaly and its classification. Attending the results obtained, all faults detected have been classified in five different thermographic defects modes: hotspot in a cell, bypass circuit overheated, hotspot in the junction box, hotspot in the connection of the busbar to the junction box and whole module overheated, with a percentage of occurrence of 75.35%, 10.79%, 6.93%, 6.84% and 0.09%, respectively.

Keywords: Photovoltaic energy, photovoltaic efficiency, thermography, thermal inspection, module defects.

1 Introduction

Cities have advanced towards a new approach known as Smart City (SC), which must progress towards new intelligent infrastructures, which will integrate new sensors and advanced communications [1]. These new SCs need to solve existing problems in transport, energy, energy efficiency, integration of renewables, mobility, citizenship, etc. [2]. The integration of high shares of Variable Renewable Energy (VRE) into energy systems requires the modification of policies, standards, and market and regulatory frameworks to effectively control the benefits that can be derived from renewables, while ensuring system reliability and security of supply [3].

Energy efficiency is key and fundamental in the SC. The population increase in cities means that the demand for energy is soaring, so it is necessary to achieve the same with fewer resources [4]. The improvement of the energy efficiency is fundamental in many areas of the SC, for example: lighting [5], actuators, electric motors of hydraulic pumps, electric motors of the industry, heating, elements of distributed generation, smart metering [6], etc.

The transformation of energy systems due to the increased deployment of renewable energy is occurring mostly in the electricity sector, where many countries have seen significant growth in deployment driven by the rapid decline in solar photovoltaic (PV) and wind power costs [3]. PV numbers during the last years show an undeniable landmark in renewable energies. The world added more capacity from solar PV than from any other type of power generating technology, and more solar PV was installed than the net capacity additions of fossil fuels and nuclear power combined, about 98 GW of solar PV capacity was installed both on and off the grid, accumulating 402 GW worldwide at the end of 2017 [3]. Sunlight based solar generators have been utilized as a part of the small-scale, low voltage levels of standalone systems and also in greatest-power establishments associated into network manner and working at any level of voltage in smart cities [7]. Some examples of building integrated PV systems are presented in Fig. 1and Fig. 2.



Fig. 1. Photovoltaic system in the rooftop of the offices of CEDER in Lubia (Soria, Spain). Image courtesy of: CEDER.



Fig. 2. Photovoltaic system integrated in the rooftop of the parking area of CEDER in Lubia (Soria, Spain). Image courtesy of: CEDER.

However, regarding energy efficiency, the little transformation productivity, which is not more than 20% for crystalline-based solar cell reaching 30% in new exploratory cells, is one of the issues the PV faces [7]. Additionally, PV configurations show non-uniform current versus voltage (I–V), and power versus voltage (P–V) characteristics [8, 9, 10], which affects the efficiency of modules and minimize their reliability. Being able to detect, to identify and to quantify the severity of defects that appear within

a module or a string is essential to constitute a reliable, efficient and safety system. In this way, it would be possible to avoid energy losses, mismatches and safety issues, especially in case of building integrated systems (in roofs or façades), as overheated anomalies could generate a fire risk [11] or an electrical hazard [12].

Usually, faulty modules or cells within a PV plant have been located by applying electrical tests to the modules like the I-V curve test, manual electroluminescence and/or manual thermography, which are costly and time-consuming techniques. I–V curves allow detecting the occurrence of defects such as cracks in operation, with the limitation of not determining the area and location distribution of cracks. Electroluminescence (EL) provides really valuable information about active and inactive areas within a module but it requires connecting the modules to a power source, which complicates the inspection of a whole site, especially in building integration for the power source logistics. The thermography technique is simpler to implement, but the accuracy of the information is lower than with the EL technique, and does not allow the measurement of broken part areas in solar cells [13]. Furthermore, applying these practices to building integrated PV systems supposes an important risk. For this reason, newer inspection techniques are being developed, with the objectives of reducing human risks, easily implementing it and decreasing examination time in large installations, as aerial thermographic inspections using Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) [14]. In these inspections, an enormous amount of thermal images are generated, in contrast to manual inspections in which the thermographer in charge of performing the inspection filters the information taking images only to the defects seen on-site. Therefore, specific programs are being developed during the last months with the objective of automatically post processing the aerial thermal images, based on the knowledge of PV modules failure patterns.

The main objective of this paper is to perform an in-depth on-site study of the modules defects of a PV plant, detecting every single defect manually, classifying them in different groups, studying the variance of the same kind of defect in different modules and the patterns of each group of thermal defects that can be used to develop a software to automatically detect if a module has an anomaly and its classification. The thermographic analysis for the identification of defects in this research is performed manually, as the spatial resolution of the thermographic images is higher than using UAVs [15]. Although new onboard thermographic cameras have first-rate resolution values, the fact is that the distance from the camera to the PV modules during the inspection is higher than during the manual inspection, thus reducing the final images resolution. Additionally, a 3 MW PV plant has been chosen with the aim of gathering larger amount of data and different cases in comparison with the information which would be available in a small installation in the rooftop of a building. However, the results are perfectly extended for their subsequent application in aerial thermographic inspections and in small scale installations in roofs or façades of buildings, as same defects have to be identified in all PV inspections.

The paper is structured in four sections, staring with the introduction to the subject that shows the importance of the integration of reliable PV systems in SC and the objectives of the study, followed by the methodology, in which the tests performed and equipment used are analyzed, afterwards the results and discussion section presents the results obtained from the field inspection and the analysis of each PV module failure mode identified and finalizing with the main conclusions obtained.

2 Methodology

The PV site that has been analyzed is located in Spain, in Castilla y León region and it has a capacity of 3 MW, with 17,142 monocrystalline modules, model STREAM 175 W, and was commissioned in 2008. Each PV table is composed by thirty-two modules, divided electrically in two arrays of sixteen modules, which are connected in parallel in the combiner box. Tables have fixed structure with 30º tilt, as it can be seen in Fig. 3. Each module has 12 cells (12x6).



Fig. 3. General image of the 3 MW PV plant in which has been developed the research.

The thermographic inspection has been performed using the traditional manual thermography method, walking all around the PV site inspecting each module with the thermographic camera. The manual camera used was a Testo 870 (Table 1). It is a precalibrated camera, in which a coded calibration data set is stored, but it should be recalibrated (on a yearly basis, as it is usual in this kind of cameras) by the manufacturer due to the possible degradation of the detector [16]. In this case, the camera has been just acquired to the manufacturer previous to the tests, so it was just calibrated. The manual camera used captures visual RGB images simultaneously to thermographic images, allowing certifying the detected failures during the post-processing steps and avoiding false positives. However, the presence of false positives is less significant in case of manual inspection, as specialists performing inspections on site can check the presence of shadows or dirt in modules during the inspection.

Table 1. Main features of the handheld thermographic camera used in the inspections.

Main features	Testo 870-2
Infrared Resolution	160 x 120 pixels
Field of View (FOV)	34° x 26°

Geometric Resolution (iFOV)	3.68 mrad
Thermal Sensitivity (NETD)	<100 mK @ 30°C
Accuracy	±2°C, ±2 %
Spectral range	7.5 to 14 μm
Image Refresh Rate	9 Hz

It has been an in-depth inspection, performed by two specialists, in which every single failure detected, regardless of its temperature, was identified and reported. The time needed to complete this inspection has been 34 working days and to post process and to analyze the results 26 working days. The defects have been analyzed using the thermographic camera software, IRSoft, in which every single defect detected has been analyzed obtaining the relative temperature of the defect, the mean temperature of the healthy area and the difference between them, which indicated the overheat of the fault.

3 Results and discussion

This section presents the results obtained from the field inspection and a review and discussion of each PV module failure mode identified, detailing different possible causes and analyzing each group in detail.

Of the 17,142 modules thermographically inspected, the number of detected modules with some failure has been 1,140, which corresponds to a 6.65%. According to some recent research, 2% of the PV modules are predicted not meet the manufacturer's warranty after 11-12 years of operation [17]. The percentage of failures detected is over this rate because every single anomaly has being reported in this study, independently of the temperature difference between the overheated area and the healthy part. This means that not all the thermographic failures identified in this research will have enough impact not to meet the manufacturer's warranty, but authors have considered relevant to report every single defect as all of them could generate a fire risk or an electrical hazard, and they could derivate in an relevant failure with the degradation and time.

These hot spots can be caused in the cells, but they can also appear in other elements, such as in the bypass diodes [18]. Attending the results obtained, all these faults detected have been classified in five different thermographic defects modes: hotspot in a cell or in a group of cells, bypass circuit overheated, hotspot in the junction box, hotspot in the connection of the busbar to the junction box and whole module overheated. The distribution of defects among these five groups can be observed in Table 2 and Fig. 4.

Table 2. Thermographic defects detected in the field inspection classified by the module affected component.

Affected component	Number of defects detected	Percentage
Hotspot	859	75,35%
Bypass circuit	123	10,79%
Junction box	79	6,93%
Connection	78	6,84%
Module	1	0,09%

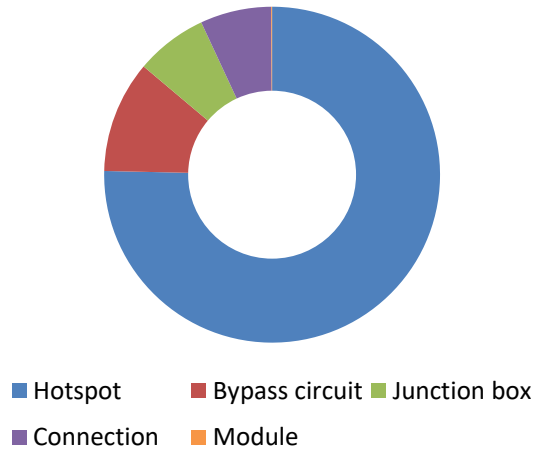


Fig. 4. Thermographic defects detected in the field inspection classified by the module affected component represented in a ring chart.

As it can be seen in Table 2, more than three quarters of the affected modules correspond to cell hotspots, presenting one or more cells overheated, followed by the bypass circuit overheated with more than a 10%, the junction box and connection hotspot, with more than a 6% and the whole module overheated, with only one defect of this type identified in the PV plant inspection. This prevailing number of hotspot failures in cells with respect to the rest of failures types is not an isolated case. Statistically, there are a greater amount of cells, 72 cells per module in this case, than of the rest of components, three bypass circuit, one junction box, four bus ribbons connection to the junction box (as it can be observed in Fig. 9) and one module. Additionally, there are a large number of causes responsible of the occurrence of cell hotspots, as cell cracks, snail trails, potential induced degradation (PID) or delamination [17].

Although some of the defects are slightly visible to the human eye, as snail trails, most of them are undetectable without the use of a thermographic camera. The severity of each specific defect, its influence in the production or the risk of fire or electrical

hazard danger should be individually analyzed with the objective of determining the action which may be appropriate in each case. In relation with the costs of arrangement of each defect, goes from a diode cost in case there is a broken diode in the junction box to the whole module cost in the rest of cases, as it would be more expensive sending the module to a specialized laboratory to replace some cells or the busbar, considering that the EVA encapsulant and the rest of module layers would have to be removed and replaced. The different defects will be further analyzed in the following paragraphs.

3.1 Cell hotspots

Hot spots, which are a serious problem in photovoltaic systems, are analyzed along this subsection. The methods of detection of hot spots are very varied, for example in [19], they use I-V techniques for the early detection of hot spots, based on the cell production and climatic information. Other authors [20] use the impedance method for the detection of cell hot spots.

The following images, Fig. 5, Fig. 6, Fig. 7, show three examples of the 859 cell hotspots detected during the study, with a difference of temperature between the healthy area and the overheated cell of 71ºC, of 63.5ºC and of 71.2ºC.

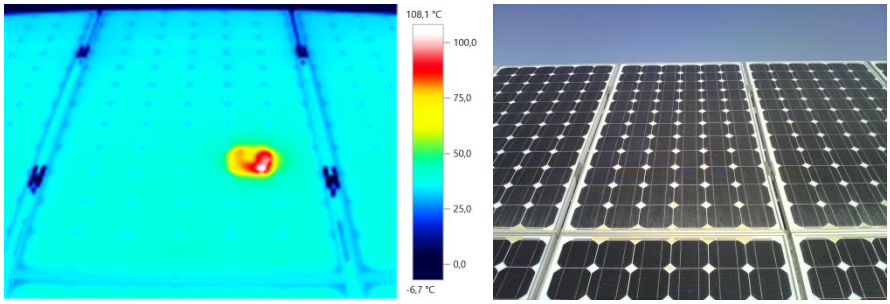


Fig. 5. Thermographic and visual image of a hotspot located in the third string of a module, with a difference of temperature of 71ºC between the healthy area and the overheated cell.

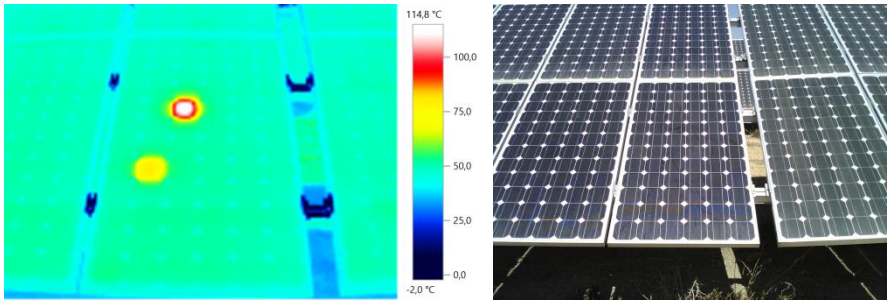


Fig. 6. Thermographic and visual image of two overheated cells within a module, one in the first bypass circuit and the most overheated in the second circuit, with a temperature difference

of 63.5ºC between the healthy area and the hotspot. Visual inspection allowed to see those defects.

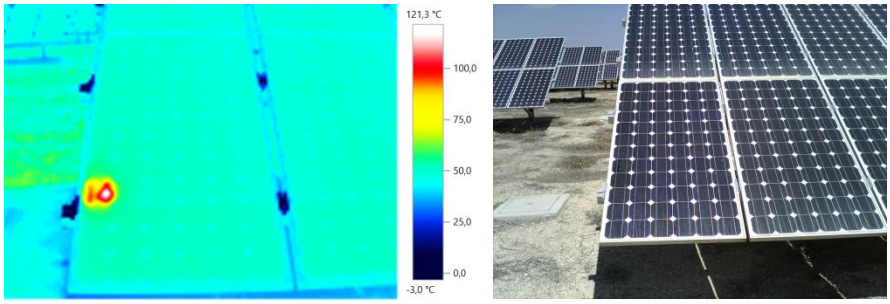


Fig. 7. Thermographic and visual image of one overheated cell in the first bypass circuit next to the module frame, with a temperature difference of 71.2ºC between the healthy area and the hotspot. Visual inspection allowed to see those defects**.**

Hotspots in cells can appear as a consequence of different failure modes. For example, cell cracks appear in crystalline silicon PV modules during their transportation from the factory to their place of installation, their installation itself, and subsequently to exposure to repeated climatic events such as snow loads, hailstorms or strong wind blows [13], which can derivate on disconnection of some parts of the cell, reducing the output generated and forcing the rest of the cell, being sometimes responsible of the appearance of a cell hotspot. Although the crack part is not totally disconnected, the series resistance across the crack varies as a function of the distance between the cell parts. PV modules may show several cracked cells. A cell crack classification is proposed in [21], grouping the cracks detected in the inspection of 574 PV modules in eight different groups, and the mean frequency of each type of crack proposed in [21] is calculated in [13]: no crack, dendritic crack (2%), several directions (24%), +45º (16%), -45º (16%), parallel to busbar (17%), perpendicular to busbar (5%) and cross crack (20%). In total, in this research it was found that 4.1% of the solar cells in the PV modules show at least one crack [21].

3.2 Bypass circuit

The possible configuration of cells within the module, and these in the overall photovoltaic generator is critical. The authors in [22] present a simulation work, with alternative solutions, and they demonstrate the improvement of efficiency of some models over others. Usual commercial modules are constituted of three 20-cell double strings connected in series. Each double string is connected in parallel to a bypass diode, which bypasses the current of a severely damaged string. Hence, power output of a module is differently affected if broken cells are located on the same string or on different strings [13]. The thermographic and visual image of one bypass circuit overheated with a temperature difference of 5.7ºC between the healthy area and the overheated bypass is presented in Fig. 8.

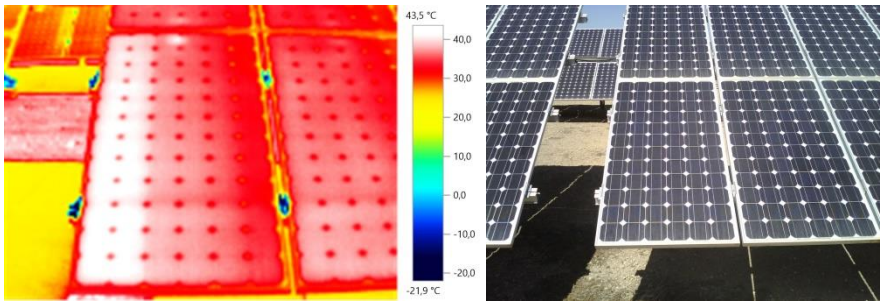


Fig. 8. Thermographic and visual image of one bypass circuit overheated with a temperature difference of 5.7ºC between the healthy area and the overheated bypass.

In case of a full electrical isolation of a cell part in case of cracks, the current produced by the broken cell, and subsequently by all the cells connected in series with it, decreases [13]. When a cell part is fully isolated, the current decrease is proportional to the disconnected area. In this case, it will appear a step in the I-V curve that originates two different Maximum Power Points (MPPs), and some of the current could be derived through the sub-string bypass diode when the Global MPP appeared at the high current step of the curve, which could be revealed as an overheated point in the junction box if this is forced or conducting the excess of current for a long time, or as an overheated bypass circuit in case the bypass diode could not recirculate the excess of current, as it can be seen in Fig. 8.

3.3 Junction box

The PV junction box is an enclosure on the module where the PV strings are electrically connected, housing all the electric bits on a solar panel and protecting them from the environment. Wires connect to diodes inside, providing an easy way to link panels together. Fig. 9 shows an open module junction box in which the three bypass diodes are visible.



Fig. 9. Module junction box open, showing the conducting strips which connect the bus ribbon to the bypass diode terminal, three bypass diodes and the terminals for the connection for the PV terminals.

A junction box has bypass diodes that keep power flowing in one direction and prevent it from feeding back to the panels when there's no sunshine, avoiding the effects caused by hot spots and shading, which can adversely affect the performance of PV modules. In a situation close to the short circuit, it would cause the shaded cell to dissipate a high power equal to that generated by the rest of cells, heating and producing the phenomenon of the hot spot. In order to avoid a power dissipation that could raise the temperature to the point of deterioration of the cell, it is necessary to insert the diodes bypass in parallel with a branch of cells connected in series. In case of using bypass diodes, the less resistance to the flow of current in case of hot spot of shading is offered by the diode and not the cell which is a polarized diode inversely.

Two examples of defects detected in the junction boxes are showed in Fig. 10 and Fig. 11. As it can be seen in the images, the defect is more marked in the back image than in the front, as the junction box is in the back and the difference measured in the back is only due to the heat transfer from conduction from the junction box. Therefore, to detect this kind of defects, it would be recommendable performing the inspection to the back of the modules; however, it is more complicated due to the PV tables inclination.

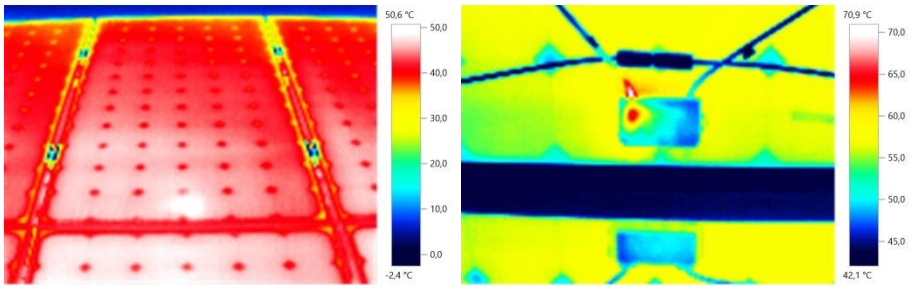


Fig. 10. Thermographic image of the front site of a module with a bypass diode overheated and of the junction box at the back of the module. The difference of temperature between the healthy and the overheated area measured with the thermographic camera is 6.7ºC and 22.6ºC respectively.

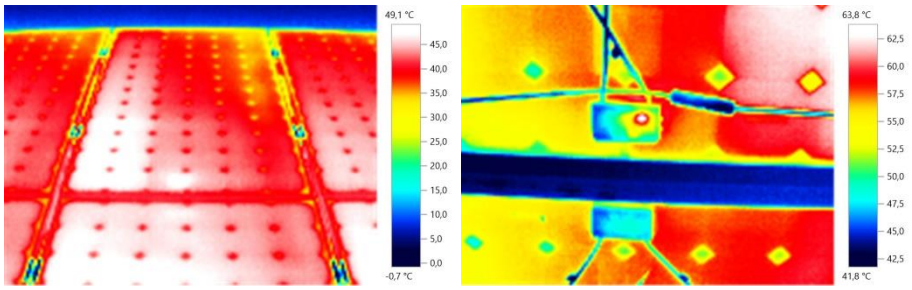


Fig. 11. Thermographic image of the front site of a module with a bypass diode overheated and of the junction box at the back of the module. The difference of temperature between the healthy and the overheated area measured with the thermographic camera is 9.3ºC and 17.2ºC respectively.

A PV junction box is attached to the back of the solar panel with silicon adhesive. It wires the four connectors together and is the output interface of the solar panel.

There are two different junction box production techniques—soldering/potting and clamping. With the soldering and potting method, foils coming out of the solar panel are soldered to the diodes in the junction box. The junction box then has to be potted or filled with a type of sticky material to allow thermal transfer of heat, keep the solder joint in place and prevent it from failing. With clamping production, a simple clamping mechanism attaches the foil to the wires. There are no fumes or major cleanup as with the soldering/potting method.

3.4 Connection

Another large field of research is the one concerning the design and topology of the connection between modules and interconnection box. The authors in [23] show the latest advances in simulation and implementation in this subject.

A busbar is a strip of platted copper that conducts electricity within a module. The size of the busbar determines the maximum amount of current that can be safely carried. Busbars can have a cross-sectional area of as little 0.8 mm^2 approximately in PV modules. The thicker bus ribbon is soldered so that it connects to the tabbing ribbon (fingers or cell interconnect ribbons) of each solar cell cluster. The tabbing ribbon collects electric current within its cluster of solar cells and delivers it to the bus ribbon (or bus wires or string interconnect ribbon) and then the bus ribbon conducts the cumulative electric power from all of the solar cell clusters to a junction box for final output. Bus ribbon is larger in cross-section because it has more electrical power to carry. The width range of these ribbons goes from 3 to 6 mm, with a thickness range from 0.1 to 0.4 mm [24].

The influence of structural defects on ribbons has been studied from long ago. By 1981, the influence of defects in laser crystallized silicon ribbons was analyzed [25], categorizing defects into two groups, surface defects associate with turbulence effects and bulk defects as dislocations and stacking faults.

An example of an overheated connection found during the analysis is introduced in Fig. 12. As it can be seen, the overheated area is not in the junction box, but in the connection between bus ribbon or bus wires and the box.

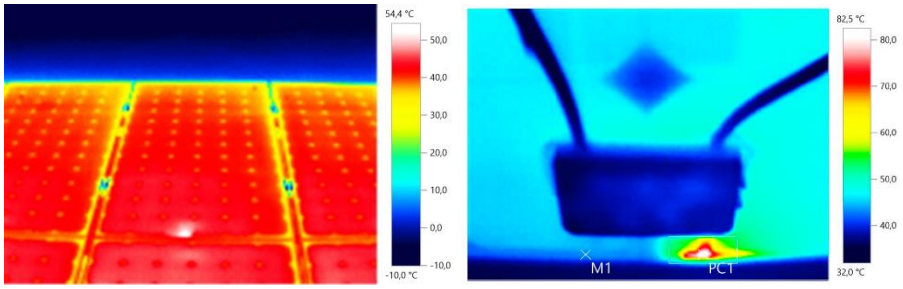


Fig. 12. Thermographic images of one overheated connection between the bus ribbon or bus wires and the junction box with a temperature difference of 11.7ºC and 35.8ºC, at the front and back side respectively.

3.5 Module

The interconnection of photovoltaic modules for the shaping of the photovoltaic generator is of great interest. For example, the authors in [26] show that the serial or parallel configuration directly affects the loss of efficiency in photovoltaic production.

Differences in temperature between a module and the rest of modules of the same row or string could be due to an erroneous connection between them, mismatching or to internal defects of the module affecting all the bypass-circuits. Fig. 13 shows the only defect in the whole module detected during the site inspection.

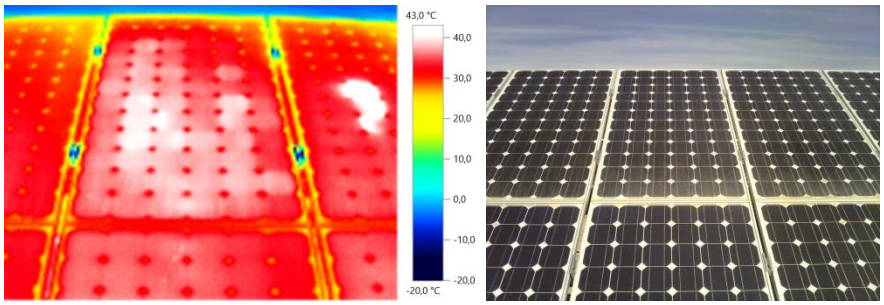


Fig. 13. Thermographic and visual images of one overheated module with a temperature difference of 10.5ºC between the adjacent modules and the overheated area.

4 Conclusions

The paper presents an on-site manual thermal analysis of 17,142 monocrystalline modules, in which every single existing defect has been detected and characterized, calculating the difference of temperature between the defect and the healthy area. All detected anomalies have been analyzed and five different groups of thermographic anomalies have been defined to classify the 1,140 defects found, studying the variance of the same kind of defect in different modules and the patterns of each group of thermal defects. Attending the results obtained, all faults detected have been classified in five different thermographic defects modes: hotspot in a cell, bypass circuit overheated, hotspot in the junction box, hotspot in the connection of the busbar to the junction box and whole module overheated, with a percentage of occurrence of 75.35%, 10.79%, 6.93%, 6.84% and 0.09%, respectively. This study could be used as a base to develop the patterns of the different kind of defects in a software to automatically detect if a module has an anomaly and its classification.

Acknowledgment

The authors thank the CYTED Thematic Network “CIUDADES INTELIGENTES TOTALMENTE INTEGRALES, EFICIENTES Y SOSTENIBLES (CITIES)” nº 518RT0558.

References

1. Pellicer, S., Santa, G., Bleda, A.L., Maestre, R., Jara, A.J., Gómez, A.: A Global Perspective of Smart Cities: A Survey. In: Seventh International Conference on Innovation Mobile and Internet Services in Ubiquitous Computing, 3-5 July 2013, Taichung, Taiwan (China) (2013).
2. Batty, M., Axhausen, K.W., Giannotti, F., Pozdnoukhov, A., Bazzani, A., Wachowicz, M., Ouzounis, G., Portugali, Y.: Smart cities of the future. The European Physical Journal Special Topics, vol. 214, no. 1, 481-518 (2012).
3. Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (REN21): Renewables 2018, Global Status Report.
4. Kling, W.L., Myrzik, J.: Energy efficiency in smart cities. In: IEEE Power & Energy Society General Meeting. 21-25 July 2013, Vancouver (Canada) (2013).
5. Castro, M., Jara, A.J., Skarmeta, A.F.G.: Smart Lighting Solutions for Smart Cities. In: 27th International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops. 25-28 March 2013, Barcelona (Spain) (2013).
6. Anda, M., Temmen, J.: Smart metering for residential energy efficiency: The use of community based social marketing for behavioural change and smart grid introduction. Renewable Energy, vol. 67, no. July, 119-127 (2014).
7. Barsana, J., Blasingh, M.: IOT Based Augmented Perturb-and-Observe Soft Switching Boost Converters for Photovoltaic Power Systems in Smart Cities. Wireless Personal Communications, 1-23 (2018).
8. George, C. K., Antonio, T. A.: Non-linear voltage regulator design for DC/DC boost converters used in photovoltaic applications: Analysis and experimental results. IET Renewable Power Generation, 7(3), 296–308 (2013).
9. Ishaque, K., Salam, Z., Syafaruddin: A comprehensive MATLAB Simulink PV system simulator with partial shading capability based on the two-diode model. Solar Energy, 85(9), 2217–2227 (2011).
10. Gallardo-Saavedra, S., Karlsson, B.: Simulation, validation and analysis of shading effects on a PV system. Solar Energy, 170, 828-839 (2018).
11. Cancelliere, P., Liciotti, C.: Fire Behaviour and Performance of Photovoltaic Module Backsheets. Fire Technology, 52, 333-348 (2016).
12. Mathew, J.K., Kuitche, J., TamizhMani, G.: Test-to-failure of PV modules: hotspot testing. In: 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, pp. 2839- 2843. IEEE, Honolulu, HI, USA (2010).
13. Morlier, A., Haase, F., Kontges, M.: Impact of cracks in multicrystalline silicon solar cells on PV module power - A simulation study based on field data. IEEE Journal of Photovoltaics 5(6), 1735 – 1741 (2015).
14. Gallardo-Saavedra, S., Hernández-Callejo, L., Duque-Perez, O.: Technological review of the instrumentation used in aerial thermographic inspection of photovoltaic plants. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 93, 566-579 (2018).
15. Gallardo-Saavedra, S., Hernández-Callejo, L., Duque-Perez, O.: Image Resolution Influence in Aerial Thermographic Inspections of Photovoltaic Plants. IEEE Transactions on Industrial Informatics (online 14 August), 1-9 (2018). doi: 10.1109/TII.2018.2865403
16. Schacht, R., Gerner, C., Nowak, T., May, D., Wunderle, B., Michel, B.: Miniaturized black body radiator for IR-detector calibration — Design and development. In: 16th International Workshop on Thermal Investigations of ICs and Systems (THERMINIC), pp. 1-5. 6-8 October, Barcelona, (2010).

17. International Energy Agency: Review of failures of photovoltaic modules. Rep. IEA-PVPS T13-01:2014, ISBN 978-3-906042-16-9. (2014).
18. Kim, K.A. Krein, P.T.: Reexamination of Photovoltaic Hot Spotting to Show Inadequacy of the Bypass Diode. IEEE Journal of Photovoltaics 5(5), 1435-1441 (2015).
19. Dhimish, M., Holmes, V., Mehrdadi, B., Dales, M., Mather, P.: Output-Power Enhancement fot Hot Spotted Polycrystalline Photovoltaics Solar Cells. IEEE Transactions on Device and Materials Reliability 18(1), 37-45 (2018).
20. Ghanbari, T.: Hot spot detection and prevention using a simple method in photovoltaic panels. IET Generation, Transmission & Distribution 11(4), 883-890 (2017).
21. Kontges, M., Kajari-Schröder, S., Kunze, I.: Crack Statistic for Wafer-Based Silicon Solar Cell Modules in the Field Measured by UV Fluorescence. IEEE Journal of Photovoltaics 3(1), 95-101 (2013).
22. Giordano, F., Petrolati, E., Brown, T.M., Reale, A., Di Carlo, A.: Series-Connection Designs for Dye Solar Cell Modules. IEEE Transactions on Electron Devices 58(8), 2759-2764 (2011).
23. Romero-Cadaval, E., Spagnuolo, G., García, L., Ramos-Paja, C.A., Suntio, T., Xiao, W.M.: Grid-Connected Photovoltaic Generation Plants: Components and Operation. IEEE Industrial Electronics Magazine 7(3), 6-20 (2013).
24. PV Busbar, http://www.thepvconnect.com/photo-voltaic-busbar/, last accessed 2018/07/12.
25. Sopori, B.L.: Structural defects in laser crystallized silicon ribbons and their influence on photovoltaic behavior. Journal of Electronic Materials, 10 (3), 517-539 (1981).
26. Mäki, A., Valkealahti, S.: Power Losses in Long String and Parallel-Connected Short Strings of Series-Connected Silicon-Based Photovoltaic Modules Due to Partial Shading Conditions. IEEE Transactions on Energy Conversion 27(1), 173-183 (2012).

The impact of transmission technologies on the evolution of the electrical grid

Luis Hernández-Callejo[1[0000-0002-8822-2948]], Amaia Arrinda[2[0000-0001-6058-1837]], David de la Vega[2[0000-0003-4811-4173]], Igor Fernández[2[0000-0002-9312-5886]], Itziar Angulo[2[0000-0002-7855-3516]]

[1] University of Valladolid, Campus Universitario Duques de Soria, Soria (Spain)
luis.hernandez.callejo@uva.es
[2] Dpt. Communications Engineering, University of the Basque Country (UPV/EHU), Alda Urquijo s/n 4803 Bilbao, Spain
{amaia.arrinda, david.delavega, igor.fernandez, itziar.angulo}@ehu.eus

Abstract. The paper describes the use of the communications technologies in the electrical network in the last decades and it provides a quick look at the significant role of these technologies in the development of new functionalities. Hence, the great evolution of the requirements of the electrical networks is summarized, from the first stages of the remote automation to a new scenario where Smart Grids and demand response will generate a different relation between utilities and final users. Then, a compilation of the main network architectures and communication protocols used in the electrical networks is outlined. Moreover, an evaluation of the benefits and drawbacks of the communication technologies, when they are applied to the last mile connectivity in electrical grids, is described. The paper concludes with a selection of the most relevant challenges of the electrical networks where the communication technologies may ne determinant as an enabling technology. In summary, the paper shows the parallel evolution of the communication technologies and the electrical grid, as a basic aspect for the development of new functionalities and services for all the agents involved in the power generation-transmission-distribution system.

Keywords: Electrical grid, Communication technologies, Wireless communications, Grid automation.

1 Introduction

The current electrical model is evolving from a strongly centralized architecture, both in power generation and in management and based on a radial transmission and distribution scheme, to a decentralized structure where new actors arise to develop new or complementary functionalities. Hence, the scheme of a unidirectional generation-transmission-distribution chain will be replaced by a distributed system.

Concepts such as Smart Grids and demand response will generate a different relation between power generation agents, utilities and final users. The user is expected to

play an active role to become a prosumer due to the promotion of local power generation. The increasing introduction of distributed power generation systems and the active role of a growing number of prosumers will lead to the accomplishment of a real-time demand response. To achieve this goal, more flexible and complex management systems that allow a rapid, efficient and robust control of the electrical network will be required.

This scenario would not be possible without the use of advanced communications system that provide all the high-demanding requirements described in the previous sentences.

2 Automation and control of the electrical grid: historical evolution

The proper performance of the electrical infrastructure is a critical factor, because power cuts cause serious economic, social and technical consequences [2]. Due to the expected radical changes in social, economic and demographic areas, the infrastructures of the cities require a radical change [1]. Due to the higher dependence on the electricity, and considering the new functionalities that are being proposed for the city of the future (*Smart City*, *SC*), the electric network infrastructure is a substantial and fundamental part of this process.

The modernization of the electrical infrastructure has not happened overnight. In the 1950s, analog communications were employed to collect real-time data of power outputs from power plants, and tie-line flows to power companies. To achieve this, operators used analog computers to conduct *Load Frequency Control* (*LFC*) and *Economic Dispatch* (*ED*) [3]. *LFC* was used to control generation in order to maintain frequency and interchange schedules between control areas, and *ED* adjusts power outputs of generators at equal incremental cost.

It is from 1960, with the advent of digital computing, when developing the *Remote Terminal Units* (*RTUs*), which were designed to collect voltage measurements, active and reactive power, and states of protection devices in substations. To make this measure possible, the use of dedicated transmission channels was necessary to interconnect the final devices with the computational center. As a consequence of the blackout of 1965 in the USA, a more extensive use of digital computers was highly recommended, in order to improve the real-time operations of the interconnected power systems. The use of computers and digital systems was considerably increased from 1970, with the introduction of the concept of system security, covering both generation and transmission systems [4].

The first control centers were based on dedicated computers, but in the subsequent years, they were gradually replaced by general-purpose computers. It is already from 1980 when the microcomputers were replaced by UNIX workstations, interconnected by means of *Local Area Networks* (*LAN*) [5]. These first networks of interconnected computers allowed a more rapid and efficient data exchange between different parts of the electrical grid.

The real revolution in the electrical system took place in the second half of 1990s, when the electrical industry launched the reorganization of the system. Since then, services ceased to be vertical and the generation, the transport and the distribution of the energy were separated. In addition, monopolies were replaced by competitive markets [6]. The combination of these both aspects marked a turning point in the evolution of the electrical system.

In this new scenario, three clearly differentiated segments were created in the electrical system: *Energy Management System* (*EMS*), *Business Management System* (*BMS*) and *Market*. The above-mentioned segments and the interaction between then are shown in the Fig. 1).

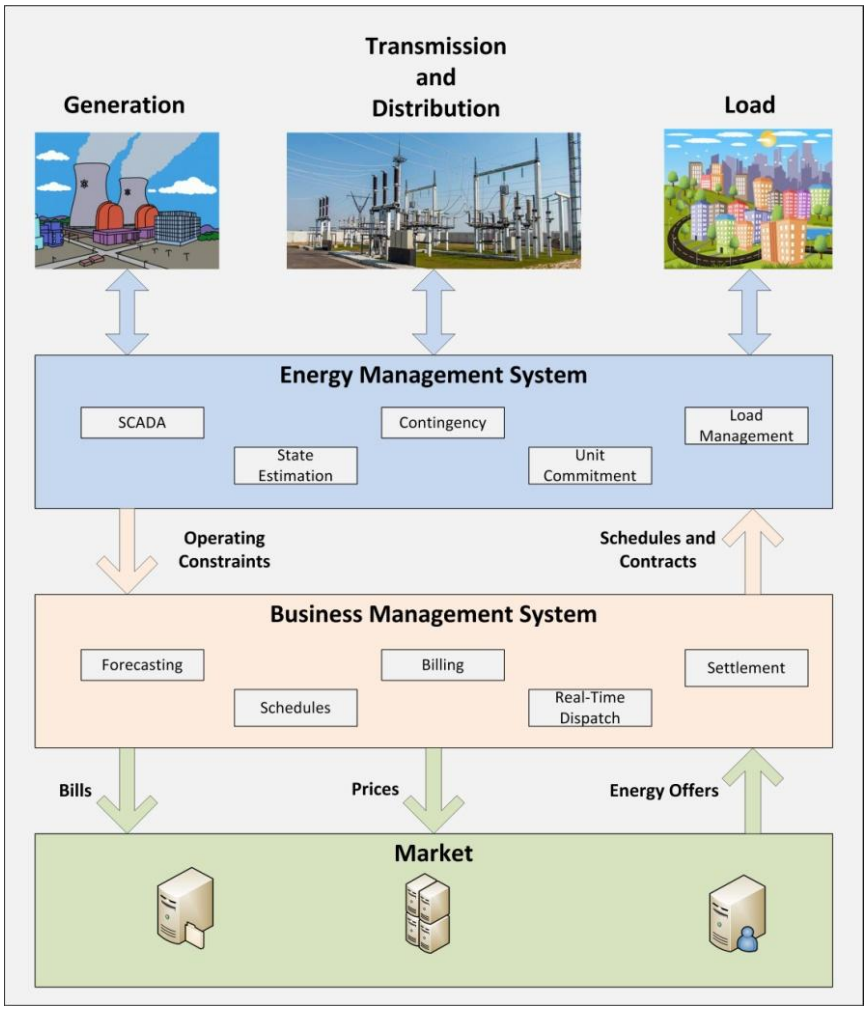


Fig. 1. Segments of the electrical system and interaction between them.

3 The role of the communications in the development of the Smart Grids

3.1 Evolution of the communication systems in the electrical infrastructure

One of the aspects that enable and foster the great evolution of the electrical system described in the previous section was the development of a robust communications layer. The communication systems used in the electrical infrastructure have also undergone great changes, in order to provide new functionalities adapted to both the evolution of the grid and to the new requirements of the companies in charge of the transmission and distribution services.

Regarding Power Line Communications (the communication technologies based on the use of the electrical cable), the electrical grid was not initially developed as a communication medium, and therefore, the high number of interferences and noise sources, together with the high variability with time and frequency, represent a great challenge for the proper performance of the data transmission.

The strong points for the use of wireless communications have been the higher flexibility, the better conditions of the propagation medium and the potential use of transmission technologies already tested. On the weak side, the difficulties to provide a complete coverage and the need of deploying the complete transmission-reception chain for each link. Nevertheless, these drawbacks were recently overcome by the use of advanced cellular technologies, such as *GPRS* (*General Packet Radio Service*) and *LTE* (*Long Term Evolution* or *4G*), which provide good rates of coverage, availability, data rate and latency. Future Smart Grids functionalities and applications rely on the better performance of wireless technologies, mainly LTE and 5G.

The historical evolution of the wired and wireless communications in the electricity grid is shown in Table 1 [7],[8].

3.2 The communication systems in the structure of the electrical grid

The performance of the a communication technology may vary depending on the conditions of the grid, such as the grid topology, the density of communication devices (users, data concentrators or substations) to be connected, the distance between them and the requirements of the communications (data rate, robustness, priority levels) and the presence of interfering electrical noise sources. For example, high-speed communications can be used for the connection of electrical substations in urban areas; however, this solution may not be feasible in other areas, such as rural environments or remote devices.

Accordingly, the network infrastructure can be separated into two zones [9]:

- Last mile connectivity: it can be understood as the high-speed communications between the substations and the control center. There are wired communications (*PLC* and fiber optic) and wireless communications (via satellite and wireless in general).

- High speed communication core network: this network can be private or public. A high-speed network for the automation of substations is Internet based on Virtual Private Network.

Although everything is important, perhaps the last mile communications are crucial for the operation of the electric network. In this sense, one type of communications or others will bring advantages or disadvantages, as can be seen in Table 2.

3.3 A representative example: wireless communications applied to automation tasks

The *Wireless Sensor Networks* (*WSN*) can be used in automation tasks [14]. Specifically, *WSN* is used in *Wireless Automatic Meter Reading* (*WAMR*) systems, for reading consumption/generation in *Smart Meters* (*SM*). *WSN* presents some benefits in automation, namely:

- The sensors used in *WSN* are reliable, self-configurable, robust and are not affected by climatic conditions (pressure, temperature, etc.).
- The coverage of a sensor is low, but the entire network of sensors converts the network into an extensive communications network.
- The *WSN* is a redundant network, due to the intervention of all the sensors.
- The sensors perform a pre-filtering, so that the network presents an efficient data processing.
- The *WSN* presents self-configuration and automatic organization of the devices.
- The *WSN* has low installation and maintenance costs.

Table 1. Evolution of the communication systems in the electrical infrastructure.

YEAR	ACHIEVEMENT	NETWORK ARCHITECTURE	COMMUNICATION PROTOCOLS AND STANDARDS	COMMUNICATION MEDIA
Before 1985	Without standardi-zation	Isolated substations Hierarchical tree Single master	Conitel 2020 ModBus SEL WISP	RS232 RS485 Power-line carrier Dial Up Trunked Radio Speed below 1,200 bps
1985-1995	Standardization begins	Redundant links Hierarchical tree Multiple master	TASE 2 IEC 60870 DNP3 Serial	Packet Radio Leased lines Speed between 9,600 and 19,200 bps
1995-2000	Local Area Network (LAN) and Wide Area Network (WAN)	Substations with peer-to-peer communications Interconnected substations via WAN	TCP-IP Telnet HTTP FTP DNP3 WAN/LAN	Ethernet Spread Spectrum Radio Frame Relay Megabit Data Rates
2000 to present	Integration within the business	Use of Internet Utility connection with business network Extension of network to customer premises	TCP-IP IEC 61850 XML Power Line Communication (PLC)	Digital Cellular IP Radios Wireless Ethernet Gigabit backbones

Table 2. Advantages and disadvantages of possible communication technologies for last mile connectivity.

Communication technology	Advantages	Disadvantages
PLC	• Wide coverage, due to the existence of already deployed power lines (distribution and transport). • Investment in infrastructure is more economical	• Electric cables conduct noise and interferences, which degrade communications [10-11]. • As the power line is a shared medium, the data rate per user is lower than the nominal capacity, depending on the number of users simultaneously transmitting. • The switches, inverters and other protection devices degrade the quality of PLC, [8]. • The impedance varies with time, network topology and devices connected at each moment, which causes that the attenuation and distortion of the signal are high and changing. • Power cables are not twisted and use no shielding, which may cause significant *Electro Magnetic Interference* (*EMI*)

Communication technology	Advantages	Disadvantages
Satellite Communication	• Satellite communication has wide coverage, which allows communication between remote substations without additional infrastructure [12].	• The latency in the communications is quite large due to the long distance between satellite and devices on the ground. • Protocols such as TCP/IP are not suitable for satellite communication, because the TCP/IP speed settings can cause a lot of delay [13]. • The use of satellite communication for remote substations may be justified, but its use for the entire electrical infrastructure can be excessively expensive.
Optical Fiber Communication	• It provides high bandwidth, required by applications such as electrical automation • There is no EMC problem • Immune to interferences from external sources.	• The cost of devices and installation is more expensive.
Wireless Communication	• Wireless communication is quick to install. • In case of cellular network, the cost of infrastructure is low, since the existing infrastructure can be used	• IEEE 802.11b presents the limitation of coverage (100 m), although other technologies such as WiMAX do not have this limitation. • However, technologies such as WiMAX can have the drawback of the absence of infrastructure in remote areas.

4 Conclusions

An essential feature in the evolution of the Smart Grids is the use of information and communications technology to gather different types of data from a distributed network of sensors and take fast decisions according to the analysis of this information. The final purpose is the improvement of the efficiency, reliability, economics, and sustainability of the production, transmission, and distribution of electricity.

The conversion of the user from a consumer to a prosumer, together with the new generated distribution systems, will change completely the architecture and the procedures to manage the electrical grid. This will lead to employ two-way communication systems in the smart grid.

In parallel, the recent developments on the wireless technologies, mainly in cellular systems, providing higher data rates, much lower latency values and the possibility to provide simultaneous service to a high number of devices, will open the door to innovative services for the users and the rest of the agents related to the electrical grid.

Acknowledgements

The authors thank the CYTED Thematic Network "CIUDADES INTELIGENTES TOTALMENTE INTEGRALES, EFICIENTES Y SOSTENIBLES (CITIES)" nº 518RT0558.

References

1. Lugaric, L., Krajcar, S., Simic, Z. Smart city — Platform for emergent phenomena power system testbed simulator. In *Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe), 2010 IEEE PES*. 11-13 Oct. 2010, Gothenberg (Sweden).
2. Executive Order *13010-Critical Infrastructure Protection.* Federal Register, July 17, 1996. vol. 61, no, 138. Pp 37347-37350.
3. Dy-Liacco, T.E. (2002). Control centers are here to stay. *IEEE Comput. App. Power, vol. 15, no. 4, pp. 18-23.*
4. Wu, F.F. (1988). Real-time network security monitoring, assessment and optimization. *Elect. Power Energy Syst.*, vol. 10, pp. 88-100.
5. Dy-Liacco, T.E. (1994). Modern control centers and computer networking. *IEEE Comput. App. Power*, vol. 7, pp. 17-22.
6. Joskow, P. (1997). Restructuring, competition and regulatory reform in the U.S. electricity sector. *J. Econ. Perspectives*, vol. 11, no. 3, pp. 119-138.
7. Gungor, V.C., Lambert, F.C. (2006). A survey on communication networks for electric system automation. *Computer Networks*, vol. 50, pp. 877-897.
8. McGranaghan, M., Goodman, F. (2005). Technical and system requirements for Advanced Distribution Automation. In *18th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, 2005. CIRED 2005.* 6-9 June 2005, Turin (Italy).
9. Tan, N.K. Building VPNs: with IPSec and MPLS. McGraw-Hill Networking:2003.

10. Uribe-Perez, N., Angulo, I., Hernández-Callejo, L., Arzuaga, T., De La Vega, D., Arrinda, A. (2016). Study of unwanted emissions in the CENELEC-A band generated by distributed energy resources and their influence over narrow band power line communications. *Energies*, vol. 9, no. 12, pp. 1-24.
11. Angulo, I., Arrinda, A., Fernandez, I., Uribe-Perez, N., Arechalde, I., Hernandez, L. (2016). A review on measurement techniques for non-intentional emissions above 2 kHz. In *2016 IEEE International Energy Conference, ENERGYCON 2016*. 4-8 April, Leuven (Belgium).
12. Tisot, A. (2004). Rio Grande Electric Monitors Remote Energy Assets via Satellite. *Utility Automation & Engineering T&D*, vol. 9, no. 4, pp. 58-60.
13. Hu, Y., Li, V.O.K. (2001). Satellite-based Internet: a tutorial. *IEEE Communications Magazine*, vol. 39, no. 3, pp. 154-162.
14. Akyildiz, I.F., Su, W. Sankarasubramaniam, Y., Cayirci, E. (2002). Wireless sensors networks: a survey. *Computer Networks*, vol. 38, no. 4, pp. 393-422.

Cloud Computing for Smart Energy Management (CC-SEM project)

Emmanuel Luján[1], Alejandro Otero[1,2], Sebastián Valenzuela[3], Esteban Mocskos[4,1], Luiz Angelo Steffenel[5], and Sergio Nesmachnow[3]

[1] CSC-CONICET, Argentina
[2] Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires, Argentina
[3] Universidad de la República, Uruguay,
[4] Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, Argentina
[5] Université de Reims-Champagne Ardenne, France.
{elujan,aotero}@csc.conicet.gov.ar,emocskos@dc.uba.ar,angelo.steffenel@univ-reims.fr,{svalenzuela,sergion}@fing.edu.uy

Abstract. This paper describes the Cloud Computing for Smart Energy Management (CC-SEM) project, a research effort focused on building an integrated platform for smart monitoring, controlling, and planning energy consumption and generation in urban scenarios. The project integrates cutting-edge technologies (Big Data analysis, computational intelligence, Internet of Things, High Performance Computing and Cloud Computing), specific hardware for energy monitoring/controlling built within the project and explores their communication. The proposed platform considers the point of view of both citizens and administrators, providing a set of tools for controlling home devices (for end users), planning/simulating scenarios of energy generation (for energy companies and administrators), and shows some advances in communication infrastructure for transmitting the generated data.

Keywords: Smart cities · cloud computing · energy efficiency

1 Introduction

Energy management is a crucial issue in modern society. Many strategies have been proposed to guarantee an increased access to the energy resources at affordable costs for citizens, while ensuring the conservation of the resources and the protection of the environment [1].

For the implementation of effective energy management policies, innovative technologies must be integrated in an easy-to-use and efficient system to include the capabilities of performing realistic simulations, controlling and planning the electricity market (to be applied by the energy companies), and end user applications to monitor and manage the energy consumption at home level. The capabilities of monitoring/controlling/managing the energy consumption and generation are key issues when implementing the smart city paradigm, especially when considering the emphasis on citizen engagement, environment protection, and economic considerations [2].

This article describes the Cloud Computing for Smart Energy Management (CC-SEM) project, developed by researchers from Argentina (Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (CONICET) and Universidad de Buenos Aires (UBA)), Uruguay (Universidad de la República (UdelaR)) and France (Université de Reims-Champagne Ardenne (Reims)), and presents preliminary results. CC-SEM proposes developing an integrated platform for smart monitoring and controlling the energy consumption in urban scenarios, by integrating Big Data analysis, computational intelligence, Internet of Things (IoT), High Performance and Cloud Computing. In our Latinamerican region, there have been some limited developments towards building some specific components for energy management, but no global solutions have been explored or made available to the public. As a consequence, the CC-SEM project proposes a useful system with real application and social relevance.

Integrating renewable energy is a relevant interest nowadays, as part of a global effort to reduce the effect of the CO_2 emissions [3,4]. However, this integration poses a big challenge for the operation of the energy grid, due to the unpredictable nature of some of the renewable energy sources, such as wind and solar. Instability on renewable energy affects the electric grid, causing voltage fluctuations, changes on current and frequency, etc. In this scenario, the utilization of specific techniques for smart grid management is mandatory. Conceiving an automatic management strategy that works correctly on macro scenarios (energy grid management and energy distribution) and micro scenarios (guaranteeing appropriate quality of service for users) is not an easy task. One viable alternative is using mathematical models and computational intelligence techniques for planning and operating the energy distribution and utilization in real time. In order to apply intelligent management systems, specific hardware is needed to evaluate and control the energy consumption by using sensors, data communications, and control devices. These devices must be able to communicate between them and with central servers to integrate all the logic of the system and determine quick responses to different dynamic situations (sudden increase in energy consumption, reduction in energy generation, increase on the energy generation costs). Recently, new smart consumption monitors were made available to be installed. For example, the Linky smart meter [5] by Électricité de France (EDF) that is being widely deployed, allowing not the collection of consumption but also some remote actions. Other projects such as ElectriSense [6] can even identify the families of devices consuming energy. None of these systems are open-source and their capabilities are often restricted to data acquisition and basic automation.

Having sensors to generate data consumption measures is not enough. Strategies to transmit and use this information should be developed and adopted by users and companies. Understanding and applying computational intelligence algorithms is one of the possible paths to analyze this data, determining routines and patterns of energy utilization by individual users. Another option is planning strategies to optimize the energy consumption, by deciding when to power on and off each device from the home, building or neighborhood. The planning

strategies will have into account the user restrictions and support real time actions from the user without having a critical impact to the planning. According to the capabilities of the devices, this planning can be fully automatized using IoT actuators or manually, by suggesting actions to the user via the smartphone interface [7,8,9].

CC-SEM project addresses the aforementioned issues, by proposing a research effort focused on building an integrated platform for smart monitoring, controlling, and planning energy consumption and generation in urban scenarios.

This article is organized as follows. Section 2 presents an overall description of the project. The main activities within the project are described in Section 3. Preliminary results are reported in Section 4. Finally, some conclusions about the ongoing work and the main lines for future work are formulated in Section 5.

2 Project description

This section describes the main features of the CC-SEM project.

2.1 Project goals and motivation

The main goal of the project is to design a platform that allows the integration of fundamental concepts and tools for energy management in smart cities, using cloud computing, computational intelligence for big data analysis, and software for simulation and optimization of the energy generation and distribution. The aim is providing both users and administrators of the electrical grid a useful set of tools for intelligent planning and organization of the electricity consumption and generation in nowadays and future smart cities. From the point of view of the users, the project proposes the design and management of a smart home controller for electric devices applying IoT related software, and the application of Big Data processing techniques for the analysis of domestic energy consumption and smart planning. From the point of view of the electric grid administrators, novel tools are presented to monitor the state of network and the overall quality of services, and the use of novel simulation tools is proposed to analyze and foresee the energy demand. This approach is planned to be adopted by electric market regulators in Argentina and Uruguay.

Energy optimization and planning is in the agenda of many countries, but there are few solutions that integrate hardware, software, and communications, to implement an easy-to-use platform to be used by both end users and energy companies. Actually, energy providers has few (or even no) knowledge about the electricity utilization in homes. With the current electrical infrastructure, it is not possible for the provider to determine if the energy is well-used or wasted. Having a hardware infrastructure that allows obtaining useful information about utilization is the first stage in a global system to optimize energy at homes, with the main goals of reducing the costs of energy consumption and generation, and improve the quality of service offered to the users.

Another important motivation of the project is to conceive a generic set of tools to allow both users and administrators to extract useful information from the raw data measured by the home controller by applying computational intelligence/machine learning techniques. The system will be controlled by communications applying the IoT paradigm to guarantee ubiquitous access to the system, everywhere, everytime, and using a wide range of communication devices (smartphones, tablets, web interface, other management systems, etc.). The applications that integrate the proposed system are conceived as a part of a global monitoring/planning system to be used in real time in modern smart cities.

2.2 Methodology

The proposed methodology, in line with the project goals, is two-fold. On one hand, the methodology is based on missions that help the project members to consolidate a collaboration network. The partners institutions have been in contact in the past: research groups at UdelaR and Reims have collaborated in research activities related to distributed computing and cloud computing, and research groups at UdelaR and UBA have collaborated in research activities related to high performance/distributed computing and applications. However, CC-SEM is the first initiative to set a common project between the three institutions. On the other hand, the research subject is realistic and represents a real need, as observed in recent contacts with Academia, Industry, and social actors related to energy management and the real implementation of the smart cities paradigm.

Due to the interdisciplinary nature of the project, and the fact that several actors (e.g., users, companies, agencies) are interested in the project outcomes, all results achieved during the project are being rapidly made available to the community via the project website, public repositories, and on seminaries, meetings, and conferences.

3 Activities

To organize our work, we decided to concentrate efforts on three major axis, covering both end user and electrical grid operator issues.

Axis 1: Automatic energy management for home devices. One of the challenges with smart metering is how to obtain consumption data. Therefore, this first research axis aimed at designing a hardware platform for monitoring and controlling domestic consumption. This platform must follow an open architecture approach, allowing future expansions without the risk of loosing compatibility or accessibility. Indeed, the IoT paradigm drives this development as it support communication between components, guaranteeing ubiquitous access to the proposed controller and software tools to be developed within the project. The development of smart metering devices has several issues that require attention: power consumption measuring, data transmission, privacy concerns, etc.

Axis 2: Big Data analytics for domestic energy consumption and smart planning. When using nowadays electric systems, a lot of data is generated minute-by-minute about the energy utilization on homes for powering domestic appliances. This data contains useful information to be taken into account when planning the energy utilization (by end users) and generation (by energy companies). In spite of this, the information is seldom used in an integrated methodology for energy optimization in city-scale scenarios. This axis focus on developing integrated methodologies and techniques for extracting useful information from the raw energy consumption data, to be used in smart energy management and optimization in urban scenarios. Because of the environmental and structural challenges in the countries covered by this project, the main focus is on energy utilization, estimation of the economic cost, and maintaining of a good acceptance and quality of service from the user perspective. Hence, this means that the user will not be forced to perform drastic changes in his daily routine but will be guided with the plans towards a more rational and comfortable usage of electricity. Also, the feedback from users consumption may help identifying situations and usages that can be improved, favoring both the utilization of electrical energy and a better life quality. Finally, data visualization both in the frontend (e.g., a smartphone application for the user) and at the backend (a dashboard with the production and consumption charts, consumption estimation, planning schedules, etc.) is also part of our objectives. All these developments will be backed with techniques from Big Data processing, computational intelligence, and cloud computing, in order to guarantee the scalability of the system.

Axis 3: Tools and algorithms for electrical network simulation. Next generation advanced power networks, the so called *smart-grids*, will have distinctive characteristics: they will be composed by a power network similar to the present ones with the addition of a communication network. One defining characteristic of smart grids is that both power and information flow in both senses, from and to the consumers, who will take a more active role. In this context, with an increasing number of devices, effective data communication strategies are needed. Some devices can communicate directly to the home user gateway and to the Internet, but many of them cannot [10]. Thus, ad-hoc networks must be established [11]. In addition, modeling real world scenarios for estimating the energy demands for a whole national power system or in big cities like Montevideo or Buenos Aires is not an easy task. The phenomena occurring in both networks working in a coupled manner, characterized by a wide range of time scales, and the level of description needed to get a detailed representation preclude the use of common simulation tools presently used by the industry. The goal of this axis is to build a unified computational framework to simulate smart grids with the capability of analyze a national-wide power network under typical situations of interest for the different actors of the power sector: generators, carriers, utilities, consumers, planners, developers, decision-makers, etc. Future smart grids will also characterize for an increasing share of intermittent renewable energy generation (mainly wind and photo-voltaic) which are dependent on the weather. Linking numerical climate modeling with load and generation models will create a novel predictive

capacity, not available in nowadays simulation tools. Models relating weather and network loads and generation will be obtained from the studies in the other research axis previously stated. The model testing and validation will be done jointly with the partnering facility operators (i.e., ADEERA in Argentina and ADME in Uruguay) by identifying the key situations to be simulated. This axis ultimately proposes integrating all the previous information and tools and build a large computing facility to ease the execution of large simulations.

4 Preliminary results

This section reports partial results obtained in the main activities of the project.

4.1 Low cost energy consumption monitor and controller

A prototype for smart metering system was designed and built according to the general specification from our project. The proposed system integrates three components: *i*) a specific module and protocol (Energy EFficiency, EFEN), which allows defining/storing user actions and preferences, and compute plannings; *ii* the monitor/controller itself, and an interface for communication with the home controllers, based on Khimo framework. These components are implemented in independent modules that allow monitoring, operating, and controlling home devices according to specific rules.

EFEN is meant to define home devices, store power consumption data, provide and interface for device control, and also compute ad-hoc planning taking into account user preferences. In EFEN, electric devices are grouped in homes, but larger aggregations are also supported: homes can be grouped in buildings and buildings can be grouped in neighborhoods. This categorization allows performing energy planning at different levels, according to the preferences of single users/community users, and/or the needs of electric companies.

EFEN also provides an Application Programming Interface (API) meant to implement the integration of computational intelligence algorithms for big data analysis/pattern recognition and energy planning, to be designed in WP 4. EFEN also includes a feasibility check for defined agendas, a tool to simulate historical power consumption time series (useful for verification purposes), energy and cost evaluation, and user satisfaction estimation algorithms.

The controller is based on a Single Board Computer (raspberry Pi, providing a flexible and portable solution) that controls other two modules: *i*) a power meter STPM01/10, integrated using the steval-ipe016v1 board, which performs the measurements using the SPI protocol, and *ii*) a relay for power supply control. The controller communicates with the central system (Khimo) via Internet. The system is controlled by the Khimo module, which allows performing communications via the IoT paradigm [12] to guarantee ubiquitous access (everywhere, everytime), and using multiple communication devices (e.g., smartphones, tablets, web interfaces, etc.). Khimo allows remote monitoring and controlling of several devices in real time.

A specific protocol (EFEN_PROTO) was developed to guarantee efficiency in the communications between Khimo and EFEN, and also to enable different functionalities for device control. Using a bidirectional communication channel, enabling event subscription, and avoiding intermittent queries (i.e., *polling*) to each controlled device, EFEN_PROTO provides efficiency for gathering power consumption and other information from devices, and also to define actions to perform regarding the state of home appliances. Action grouping is applied to deliver messages of the same type. By grouping home appliances according to the actions to perform over them, EFEN_PROTO avoids redundancy, thus improving the communication efficiency.

A greedy algorithm was proposed as a first step to design computational intelligence methods for home energy planning. The greedy algorithm focuses on minimizing power consumption and maximizing user satisfaction, by taking local decisions to build a global agenda and considering the maximum power available is a hard restriction.

The main details about the design of the controller were published in [13] and the application of IoT-based information for designing simple heuristics for smart home energy planning were described in [14]. Further details can be found in the website https://www.fing.edu.uy/inco/grupos/cecal/hpc/EFEHO.

4.2 Characterization of domestic energy consumption

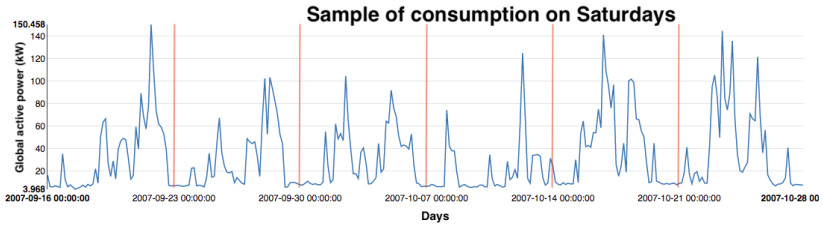
The massive expansion of smart meters created the opportunity to gather costumers data and use big data algorithms to extracting useful information to be used by machine learning and planning tools.

On the literature we mostly found methodologies to estimate the electric load at the system level. Indeed [15,16], the electrical consumption at the system scale often follows seasonal variations at macro and micro scale (seasons, weekdays, hour of the day), and the aggregation of several customers profile produces a smooth profile with consistent patterns that favor the forecasting accuracy. Unlike the system-level load, the individual residential consumption depends on the daily routine and users lifestyle but also on other elements that are harder to predict. For instance, while it is easy to forecast the consumption of a programmable water heater, it is much harder to estimate the consumption of other devices that may be activated alone or at the same time (does one always turn on the oven and the dishwasher at the same time?). Some external elements such as the air temperature and the external weather can help to improve the predictions, but they also have a limited impact and correlation, depending on the residential characteristics (solar exposure, gas or electric heating), the thermal inertia of the buildings and the psychological resiliency of the inhabitants.

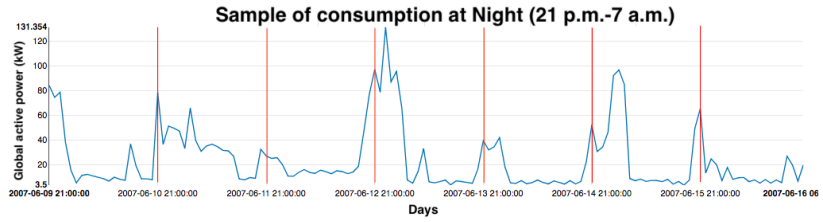
Due to the objectives of our project, our goal is less to predict the exact consumption for each user but rather to identify potential peaks that, combined with the consumption from other users, may lead to disturbances in the local distribution grid (in a building or in the neighborhood). Hence, we try to predict situations that may stress the grid and trigger passive (warning the users) or active (automatic shutdown of devices) measures to avoid the overload.

Several datasets for energy disaggregation can be found on the literature [6]. We chose to start by analyzing the *Individual household electric power consumption dataset* from Hebrail and Berard [17] as this dataset covers more than three years of consumption of a house located at the south of Paris, France. It presents the overall consumption and the detail of specific sets of devices, with a resolution of one minute between measures. Furthermore, weather data for that location can be easily obtained from MeteoFrance[7].

Our first analysis involved the attempt to extract consumption patterns, like for example the profile for each weekday or for parts of the day (dawn, morning, afternoon, night), which are reputed to present similar behaviors. Neither of the categories we tested leaded to conclusive results, as illustrated in figure 1. Indeed, we see that two different days/periods have different consumptions profiles even if they belong to the same categories, making it hard to forecast the residential consumption. We also tried to correlate the consumption with the local weather, but the residence from this dataset seems to rely on other energy sources for heating and cooking (gas or oil), so the electrical consumption profile was driven mostly by less powerful devices that depend a lot on the users habits. While a few patterns pointed by Hong [18] could be extracted, they have small importance in the overall consumption and don't help forecasting.



(a)



(b)

Fig. 1: Example of individual consumption classified by day of the week (a) or by time of the day (b)

[6] http://wiki.nilm.eu/datasets.html

[7] https://donneespubliques.meteofrance.fr/?fond=produit&id_produit=90&id_rubrique=32

As specific seasonal patterns could not help the prediction of the residential consumption, our next approach was to use deep learning techniques such as Long-Short Term Memory (LSTM). LSTM is a type of recurrent neural network designed for sequence problems such as time-series analysis and forecast. In our specific case, we aimed at training the model to predict the consumption of the residence based on a sequence of previous measurements. Therefore, using the previous dataset, we constructed a simple LSTM network using the Keras library and a non-negative output constraint. Using 30% of the dataset as a training set (what roughly corresponds to a year of measures), we obtain good predictions on the remainder of the dataset (RMSE=35), as illustrated in figure 2. At this point of our work, we didn't tried to optimize the parameters or develop more elaborated LSTM networks.

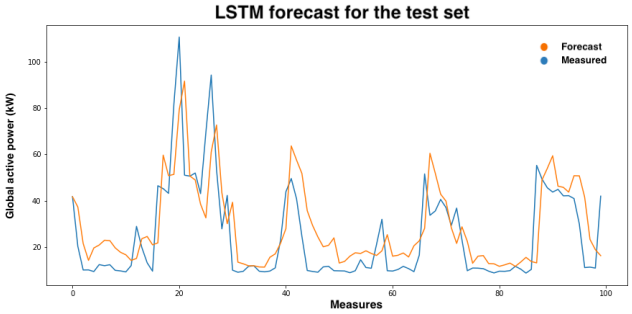
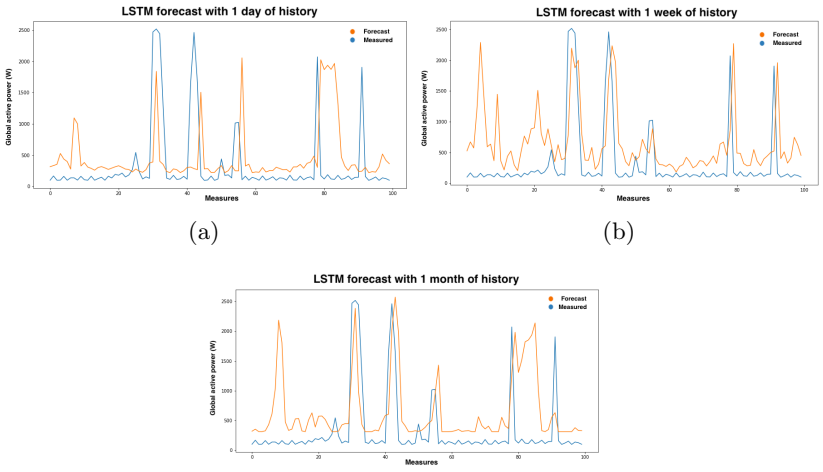


Fig. 2: Sample of LSTM forecast for the reference dataset

One inconvenient of applying deep learning techniques to the consumption of each residential user is that we need sufficient data to train the model. Indeed, a good training requires at least a few months of readings, which would delay the start of operations for new costumers. As a consequence, we decided to to circumvent this drawback by applying an existing model (from another residence) and verifying its effectiveness.

Therefore, we applied the LSTM model trained with the previous dataset over an independent dataset, obtained from a real user through the Linky smart meter [5]. Contrarily to the reference dataset, this second residence fully relies on electricity for heating and cooking, which can raises different consumption profiles. Three different intervals were compared as input history for the LSTM model: 1 day, 1 week and 4 weeks (roughly a month), as illustrated in Figure 3. Forecasts using only 24h of history tend towards the "persistence" of the previous state, evidencing the lack of data. Forecasts with a month of history are better but tend to smooth the consumption and raise the expectation for the lower values. Finally, the forecasts made with a week of history seem to offer the better trade-off between accuracy and the history length.

While prediction errors still occur (mostly "false positive" forecasts, like for example on the mark 1-20 on the samples), these estimations are good enough to



(a) (b)

(c)

Fig. 3: LSTM forecasts with different history lengths: (a) 1 day, (b) 1 week and (c) 1 month.

help a recommendation system or to help detecting potential overloads (summing up the expected consumption from several residences). As expected, the RMSE is quite important (300 or more) but at least we have a baseline model that can be quickly deployed. As soon as a sufficient number of measurements is collected, individual models can be created by incrementally training the model. Also, specific parameter optimizations can be performed to improve the accuracy.

The scalability and portability of the developed solution can be ensured by relying on basic ETL (Extraction, Transformation, Load) using MapReduce, while more advanced operations can be conducted with high-level tools (e.g., Pig or Apache Spark and Tensorflow/Keras). Storage and access to the data can be made using NoSQL databases, which are especially adapted to store data series from sensors and other data sources (e.g., power generation, historical consumption charts, weather forecast) [19].

4.3 Renewable energy generation forecast

Although there are some options to produce energy from wind and other sources, photovoltaic (PV) systems are the more likely way to generate renewable energy in an urban setting in a massive scale. The challenges for adopting higher shares of this type of energy are posed by its intermittence, inherited from solar radiation dependency on local climatology, mainly the cloud cover. In order to be able to forecast PV generation for a particular system in a specific location, both consideration about the resource and the system should be taken. To this end, in this project we combined the WRF[8] model with a PV modeling library called

[8] https://www.mmm.ucar.edu/weather-research-and-forecasting-model

`pvlib-python` [20,21]. The `pvlib-python` library comes with some functions to retrieve weather forecast data from some particular web services, thus through minimal modifications it was adapted to read data produced by our installation of the WRF model.

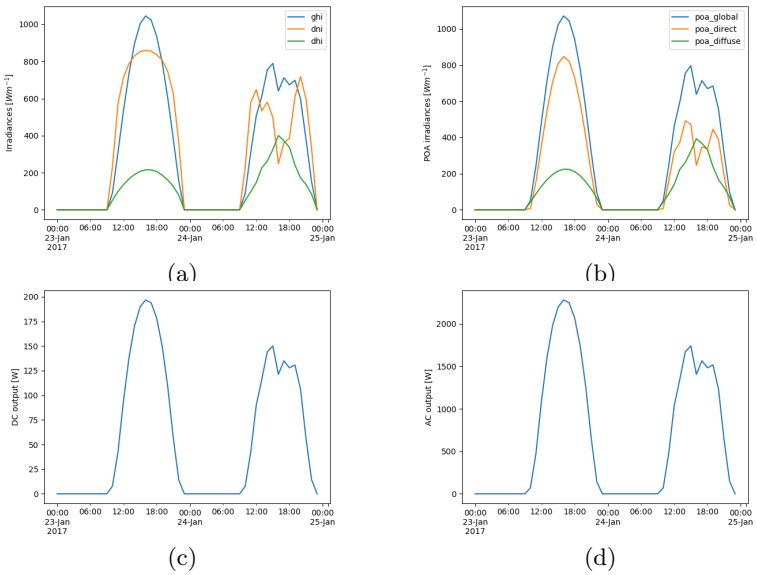


Fig. 4: Example output of the pipeline of PV generation forecast for two sample days with different solar resource characteristics.

In this setting, the pipeline to get generation data from weather prediction models for a particular PV system is as follow:

1. WRF provides forecast for irradiances: global horizontal (*ghi*), diffuse horizontal(*dhi*), and direct normal(*dni*); and other variables which affect the PV system working condition like temperature and wind speed (see figure 4a).
2. Irradiance data is processed through `pvlib-python` to obtain irradiance components projected on the the PV modules plane-of-array (POA): global (*poa_global*), direct (*poa_direct*), and diffuse (*poa_diffuse*) (see figure 4b).
3. Considering the configuration (number of series and parallel connected) and model of PV modules, the `pvlib-python` is used to forecast the DC power production (figure 4c shows the individual generation of each module).
4. Regarding the information about the PV inverter of the system, the AC power is forecasted (figure 4d shows the aggregated system AC power).

The proposed methodology allows forecasting the generation of individual PV systems. Although figure 4 shows data in an hourly base for convenience, more frequent sampling can be obtained as the actual model time step is much smaller,

allowing to capture the dynamics of the possible generation. For modeling multiple systems assigned to the same WRF grid point, for which no difference will be detected in the radiation forecast, equivalent systems could be defined. At the moment, development efforts are focused on model calibration and validation. Several configuration and submodel options could be chosen and a systematic error quantification study is under way.

4.4 NB-IoT in smart cities: optimizing bandwidth usage

To assess the state of smart cities [22], smart sensors are deployed to monitor the grid, those devices inform magnitudes that can be used to derive information about the whole urban scenario. Thus, the supporting communication network plays a fundamental role to ensure collecting state information. While wired networks entail high economic costs, wireless networks are positioned as a competitive alternative [23]. In particular, the exponential growth of cellular wireless networks establish a powerful infrastructure for the new communication technologies. In recent years, a narrow band radio technology ($<$ 200 kHz) has been developed: Narrow Band Internet of the Things (`NB-IoT`) [24]. It is designed to satisfy requirements of low-bitrate applications, with special emphasis in coverage enhancement, ultra-low power consumption and massive terminal access. Another characteristic of this technology is non-latency-sensitivity, despite this, high channel occupation scenarios occur, thus, increasing latency levels over tolerable thresholds (up to 10 seconds). These scenarios generate a negative impact in user equipment such as smart alarms, where successful message deliver is a must. A proper distribution of radio resources offer a useful tool to overcome this challenge. Here we present preliminary results of an `NB-IoT` priority-based uplink scheduling algorithm, with the goal of mitigating latency issues over prioritized smart devices.

In an `NB-IoT` communication cell, during the uplink process, the base station (`BS`) determines the modulation and coding scheme (`MCS`), and the number of repetitions (`NR`) that will be used for the user equipment (`UE`), i.e. the smart device. These parameters determine the number of resource units (`RUs`) of the encoded transmission block that has to be send, as well as they determine the block error rate ($BLER$). Thus, the `BS` can adjust the number of block losses of each device, with a correlated `RU` cost.

In our general proposal, framed in uplink unacknowledged transmission scenarios, the `BS` schedules priority devices first, but with one important addition: the definition of different tolerable block error rates ($BLER_{tol}$) to each device according to its priority. In extreme coverage scenarios, zero $BLER_{tol}$ can not be guaranteed to every device, hence we reserve this value for maximum priority devices. Surely, low $BLER_{tol}$ has associated an `RU` cost drawback, but in exchange it ensures message successful arriving.

`BS` actual algorithms conform proprietary software of each manufacturer, however there are currently methods available in literature [25]. In this preliminary development stage, we propose an straightforward `BS` strategy (1) for

calculating (MCS,NR) tuple, based on mentioned previous work. Successive iterations approximate $BLER$ to $BLER_{tol}$. This algorithm allows to estimate the RU cost associated to a particular $BLER_{tol}$, which is a fundamental piece of the general scheduler.

Currently there are no FLOSS software tools for running and testing this kind of algorithms. To accomplish this task, we developed a reduced NB-IoT uplink simulator which depicts the uplink iterative sub-process, where the BS determines the MCS and NR and sends this information to the smart device.

1: **repeat**
2: *Estimate BLER*
3: **if** $BLER > BLER_{tol}$ **then**
4: **if** $MCS > MCS_{min}$ **then**
5: $MCS \leftarrow MCS - 1$
6: **else if** $NR < NR_{max}$ **then**
7: $NR \leftarrow NR * 2$
8: **else if then**
9: Bad channel quality.
10: Target BLER can't be achieved.
11: **end if**
12: **else if** $BLER < BLER_{tol}$ **then**
13: **if** $MCS < MCS_{max}$ **then**
14: $MCS \leftarrow MCS + 1$
15: **else if** $NR > NR_{min}$ **then**
16: $NR \leftarrow NR/2$
17: **else if then**
18: Good channel quality.
19: RU consumption can't be decreased.
20: **end if**
21: **else if then**
22: BLER is in range.
23: **end if**
24: **until** $BLER = BLER_{tol}$ {re-scheduling is not needed}

Algorithm 1: MCS-NR

Figure 5 reports preliminary results. The experiment consists in 500 realizations of a UE transmitting to the BS 20 blocks of 256 bits, i.e, the magnitude of a possible alarm message. The RU cost of possible target $BLER_{tol}$ was estimated considering three characteristic coverage scenarios, represented by different signal-to-noise (SNR) values: -16, -7 and 2 dB.

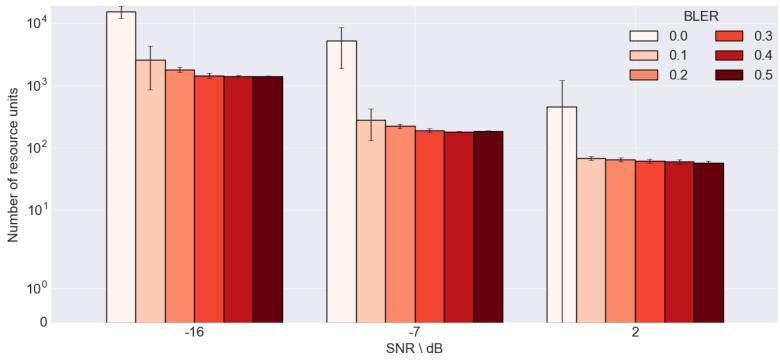


Fig. 5: Estimated RU cost for each target $BLER$.

Figure 5 also shows a reasonable trade-off between radio resource consumption, associated with transmission costs: bandwidth, latency and channels occupancy; and block losses, associated with *BLER*. Obtained results points out that an adequate *BLER* threshold is between 0 and 0.1 (0 and 10% of block losses), which is the transition with highest `RU` gradient.

It is expected that the outcome of the whole scheduling strategy be relevant in the design and implementation of future `BS` software, mitigating transmission cost issues over prioritized smart devices, improving communication quality.

5 Conclusions and future work

This article presented an overall description of the CC-SEM project in conjunction with preliminary results. In this project it is proposed to build an integrated platform for smart monitoring, controlling, and planning energy consumption and generation in urban scenarios. In particular three main activities were specified.

Regarding *axis 1*, where the defined goal was to automatically manage energy for home devices, main contribution consisted in the development of a low cost IoT device capable of monitoring, operating, and controlling home appliances according to predefined rules.

With respect to *axis 2*, in which it was proposed to utilize Big Data techniques for analyzing domestic energy consumption and smart planning; the contribution was based on the analysis of domestic consumption patterns to help predicting home consumption through a sequence of previous measurements. The obtained estimations were good enough to help a recommendation system or to help detecting potential network overloads.

In the last activity, *axis 3*, the objective was to simulate an electrical network (which includes three stages: generation, transmission and distribution) with the addition of a communication network. Following two main contributions were presented: on the one hand, a new methodology to forecast the generation of individual PV systems was proposed. A WRF model was combined with a PV modeling library called `pvlib-python`. This approach results of utterly importance due to PV systems represent a major technology for massive renewable energy generation within urban scenarios. On the other hand, a last contribution was focused in telecommunication technologies associated with smart cities to support the increasing need of data transference. Preliminary results of an `NB-IoT` priority-based uplink scheduling algorithm were reported, with the goal of mitigating latency issues over prioritized smart devices, such as smart alarms, where successful message deliver is necessary.

The main lines for current and future work include performing a deep analysis of home consumption patterns to better characterize specific behaviors of citizens regarding other data sources, including socio-economic, weather, and neighborhood-related data. The project will also continue to explore IoT development with new sensor technology and advance in establishing a program of controlled scaled domestic measurements. Finally, regarding smart grid, new

infrastructure will be analyzed focusing on creating a new communication layer on top of electric network.

Acknowledgment

CC-SEM project is supported by the STIC-AmSud regional program (France–South America).

References

1. W. Turner and S. Doty, *Energy management handbook*. The Fairmont Press, 2007.
2. A. Towsend, *Smart Cities: Big Data, Civic Hackers, and the Quest for a New Utopia*. Ww Norton & Co, 2013.
3. A. Soares, C. Antunes, C. Oliveira, and A. Gomes, "A multi-objective genetic approach to domestic load scheduling in an energy management system," *Energy*, vol. 77, pp. 144–152, 2014.
4. A. Zakariazadeh, S. Jadid, and P. Siano, "Economic-environmental energy and reserve scheduling of smart distribution systems: A multiobjective mathematical programming approach," *Energy Conversion and Management*, vol. 78, pp. 151–164, 2014.
5. Y. Wahyuddin, "To What Extent the Grand Lyon Metropole can harness the Smart Meter Project towards the Governance of Territorial Climate Energy Plan (PCET) Study case: Smart Electric Lyon project initiated by EDF [French Electric Utility Company]," in *International Conference on Public Policy*, 2017.
6. S. Gupta, M. Reynolds, and S. Patel, "Electrisense: Single-point sensing using emi for electrical event detection and classification in the home," in *Proceedings of the 12^{th} ACM International Conference on Ubiquitous Computing*, pp. 139–148, 2010.
7. A. Spagnolli, N. Corradi, L. Gamberini, E. Hoggan, G. Jacucci, C. Katzeff, L. Broms, and L. Jonsson, "Eco-feedback on the go: Motivating energy awareness," *Computer*, vol. 44, no. 5, pp. 38–45, 2011.
8. L. Gamberini, A. Spagnolli, N. Corradi, G. Jacucci, G. Tusa, T. Mikkola, L. Zamboni, and E. Hoggan, "Tailoring feedback to users' actions in a persuasive game for household electricity conservation," in *Persuasive Technology. Design for Health and Safety* (M. Bang and E. Ragnemalm, eds.), (Berlin, Heidelberg), pp. 100–111, Springer, 2012.
9. E. Costanza, S. Ramchurn, and N. Jennings, "Understanding domestic energy consumption through interactive visualisation: A field study," in *Proceedings of the 2012 ACM Conference on Ubiquitous Computing*, pp. 216–225, 2012.
10. J. Rabaey, M. Ammer, J. da Silva, D. Patel, and S. Roundy, "Picoradio supports ad hoc ultra-low power wireless networking," *Computer*, vol. 33, no. 7, pp. 42–48, 2000.
11. D. Niyato, L. Xiao, and P. Wang, "Machine-to-machine communications for home energy management system in smart grid," *IEEE Communications Magazine*, vol. 49, no. 4, pp. 53–59, 2011.
12. S. Karnouskos, "The cooperative Internet of Things enabled smart grid," in *14^{th} IEEE Int. Symp. on Consumer Electronics*, pp. 7–10, 2010.

13. E. Orsi and S. Nesmachnow, "Iot for smart home energy planning," in *XXIII Congreso Argentino de Ciencias de la Computación*, 2017.
14. E. Orsi and S. Nesmachnow, "Smart home energy planning using IoT and the cloud," in *2017 IEEE URUCON*, IEEE, 2017.
15. W. Kong, Z. Dong, Y. Jia, D. Hill, Y. Xu, and Y. Zhang, "Short-term residential load forecasting based on lstm recurrent neural network," *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2017. Early access.
16. K. Amarasinghe, D. Marino, and M. Manic, "Deep neural networks for energy load forecasting," in *IEEE 26th International Symposium on Industrial Electronics*, pp. 1483–1488, 2017.
17. D. Dheeru and E. Karra Taniskidou, "UCI machine learning repository." [May 2018].
18. S. Hong, "Individual household electric power consumption." [May 2018].
19. K. Zhou and S. Yang, "Understanding household energy consumption behavior: The contribution of energy big data analytics," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 56, pp. 810–819, 2016.
20. W. Holmgren, R. Andrews, A. Lorenzo, and J. Stein, "PVLIB Python 2015," in *2015 IEEE 42nd Photovoltaic Specialist Conference*, pp. 1–5, 2015.
21. W. Holmgren and D. Groenendyk, "An open source solar power forecasting tool using pvlib-python," in *2016 IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference*, pp. 0972–0975, 2016.
22. IEEE, "Smart cities." https://smartcities.ieee.org/. [Online; accessed September 11, 2018].
23. C. A. Ramrez, R. C. Barragn, G. Garca-Torales, and V. M. Larios, "Low-power device for wireless sensor network for smart cities," in *2016 IEEE MTT-S Latin America Microwave Conference (LAMC)*, pp. 1–3, Dec 2016.
24. Y. . E. Wang, X. Lin, A. Adhikary, A. Grovlen, Y. Sui, Y. Blankenship, J. Bergman, and H. S. Razaghi, "A primer on 3gpp narrowband internet of things," *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, pp. 117–123, March 2017.
25. C. Yu, L. Yu, Y. Wu, Y. He, and Q. Lu, "Uplink scheduling and link adaptation for narrowband internet of things systems," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 1724–1734, 2017.

Using smart-grids capabilities as a natural hedge against novel risks coming from non-conventional renewable electricity generation

Claudio Risso

Facultad de Ingeniería, UdelaR, Montevideo, Uruguay.
crisso@fing.edu.uy

Abstract. Whether due to economic pressure or environmental concerns, the penetration rate of renewable energies has been increasing over recent years. Uruguay is a leader country in the usage of renewable energies, getting 98% of its electricity from such sources. Its lack of fossil energy resources has historically pushed this country to rely on hydro-energy. Recently, in a scenario where most natural hydro-resources have been deployed, Uruguay has moved to non-conventional renewable energies, to biomass and wind power mostly, although nowadays solar sources are rapidly increasing. As clean and financially stable as they are, non-conventional energies have weaknesses. Unlike thermic and most hydro-sources, wind and solar energies are not controllable, are intermittent and uncertain some hours ahead, complicating the short-term operation and maintenance of electrical systems. This work explores how to use smart-grids capabilities to adjust electricity demand as a natural hedge against novel short-position risks in the Uruguayan electricity market.

Keywords: renewable energies, smart-grids, short-term power dispatch scheduling, combinatorial optimization

1 Introduction

The absence of fossil energy sources, such as oil, coal or gas, spurred decades ago to Uruguayan authorities to invest in hydroelectric dams as its main source of electricity. Unlike fossil resources, the country accounted important hydraulic assets. Hence, Uruguay historically figured among top countries regarding the percentage of electricity coming from renewable sources. The national electric power matrix was complemented with conventional oil-fired thermal generation plants. Later on, the interconnection with its border neighbors (Argentina and Brazil) supplied and additional level of resilience and robustness to the system. As demand grew, the frequency at which thermal generation plants were used increased as well, so did the energy costs. Similar conditions were taking place in Argentina and Brazil, so importing electricity was as expensive as importing oil to keep thermal plants running. By 2007, the situation became critical and the national authorities started a process of diversification of the power sources, which aimed on biomass and wind power at early stages. Today, Uruguay is a

world leader in the usage of renewable energies, serving 98% of its own demand of electricity from renewable sources (see [8]).

Energy by Type of Source	Number of Units	Installed Power Plant (MW)	Relative Subtotal	Produced Energy Total 2017 (GWh)	Relative Subtotal
Biomass	12	200	4.4%	900	7.1%
Wind-power	37	1.437	31.5%	4.400	34.9%
Solar	17	230	5%	200	1.6%
Hydroelectric	4	1.534	33.7%	6.200	49.2%
Combined Cycle	1	550	12.1%	100	0.9%
Other Thermal Units	4	604	13.3%	800	6.3%

Table 1. Installed power plant by type of energy source [ADME:2017]

Table 1 presents the main details regarding the Uruguayan power plant by late 2017. The source is ADME (Administración Del Mercado Eléctrico) and it is available at http://adme.com.uy. The extremely low dependence upon fossil energies isolates the Uruguayan electricity market from commodities volatility. On the other hand, and as it counts in Table 1, over one third of the total energy consumed comes from wind-power, which is highly volatile in the short-term. Variable renewable energies (VRE) have a negative impact in the operation costs of the system. Real-world examples (UK and Germany) of such problems are described in [2]. Managing the electric grid of a country is a challenging task that must be carried out carefully and optimally. In order to accomplish that, multiple problems are to be solved, spanning different scales of time and components. Main objects are: generating plants, the transmission and distribution networks. Long-term planning usually applies to assess the return of investments over those objects along many years ahead. Medium-term planning usually refers to the valuation of intangible resources, such as the height of the lake in an electric dam accounted as an economic asset. Short-term planning consists in crafting optimal dispatch schedules some days ahead, in order to efficiently coordinate the usage of available resources. Beyond that time scale, there are almost real-time models to keep the physical variables of the system (e.g. frequency, active and reactive power) under control. This work aims on the short-term power dispatch of the grid, whose results set the prices of energy in the electricity market. Due to its short scale of time (a few days ahead), such models can assume many sources of uncertainty as deterministic. For instance, oil prices can be considered as fixed along some days to follow, and although sudden/unexpected rains could arise, they hardly change the level of water reservoirs to a significant point.

The former premisses are actually quite realistic when applied to conventional and some non-conventional energy sources (e.g. biomass). Regarding wind and solar power however, those hypotheses become erroneous. The intrinsic stochastic nature of wind and solar power turns out the short-term dispatch of the grid into a much harder challenge, which is object of academic and industrial interest (see [3] and [6]). In its economical dimension that volatility indicates that wind-energy constitutes a risk position. Under steady conditions (energy prices, weather conditions, date of a year) demand is highly predictable, so given a par-

ticular date of the year
grid is among those variables that could be considered as known. T
to low deviations associated with a large number of users under a stationary behaviour. As a consequence, legacy short-term optimal schedules models are deterministic, or deal with narrow variance in the variables. In addition, traditional instruments to modulate demand with economic measures go by setting different prices between hours on a day, intending to move a fraction of energy consumption from the demand's peak hour towards demand valleys (night-valley filling). Such instruments are based on the premisse that energy is scarce, while the truth is that non-conventional energies, especially wind-power, can be either lower or higher than forecasted. Smart-grid technologies are a cornerstone for Smart-cities paradigm. Smart-grids allow to coordinate important portions of the demand, which could now be directed in opposite direction to wind-power variations and accounted as a hedge instruments against generation risks (demand response). There are many ways to get benefits from demand control. For instance, works [4], [5] and [7] are inspired in a free-market environment, with a kind of underlying stock exchange where energy offers are traded. Sometimes this is not possible due to regulatory or scalability issues. Besides, wind and solar power fluctuate so rapidly, that implementing classical financial contracts (e.g. forwards or swaps) is not always optimal, even a-day-ahead. Using batteries is another instrument to compensate power variations in the offer with demands. This document explores the benefits of using smart-grid technologies and residential energy storage, to coordinate part of the residential demand with the uncertain offer of energy in the system. The application case is based on the particulars of the Uruguayan market, where only large-scale energy consumers are allowed to trade in the electricity market, while residential users only can get electricity from the state-owned company. In this wholesale electricity market, the price is not set by pairing bids and offers. Instead, their production parameters of generators (e.g. minimum and maximum power, fixed and variable costs) are public, and up from them, the authorities that operate the system dictate when and how much energy is going to be produced by each unit. Production decisions are driven by a short-term reference optimization model, whose objective function aims on minimizing the total cost of generation. Such premisses are ideal for the approach presented in this work, which is stated from a short-term point of view optimization. These results show how the existence of smart-grid technologies allow to improve the efficiency of the system, not the return of the investments necessary to achieve such smart-grid grade. Problem instances are based on real data of the Uruguayan market, chosen to be representative of different scenarios. The remaining of this document is organized as follows: section-2 shows the shot-term volatility of wind power and the techniques used to master it; section-3 describes the main characteristics of the optimization models used to estimate the benefits of counting with smart-grid technologies; section-4 presents the set of test scenarios used as instances of the previous models; while section-5 summarizes the main conclusions of this work and lines of future work.

2 Dealing with Wind Power Uncertainty

This section shows how variable wind-power is, when described as a stochastic process, and it briefly presents some of the techniques used to likely fence its realizations. The historical of wind-power data in Uruguay has a few years, and along this period the installed power plant was firmly growing, so instead of expressing power in term of MW we use the Plant Load Factor (PLF), which corresponds to the actual power generated at each time, divided by the sum of the installed power capacity of each wind turbine in the system at each moment. So, $0 \leq \text{PLF} \leq 1$ for each hour. Hence, information is normalized, and we can disregard of changes in the installed capacity during the period of analysis.

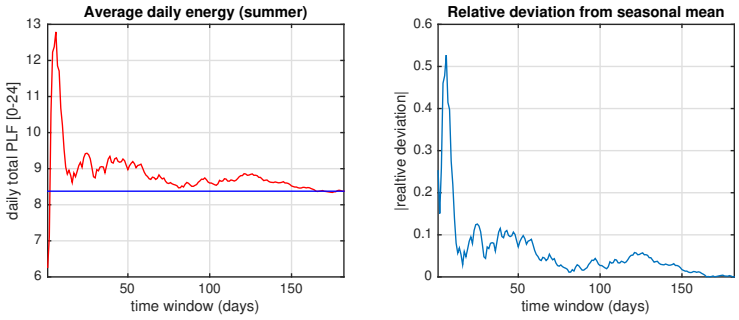


Fig. 1. Time window average for daily wind energy on summer days

Figure 1 shows the daily cumulated PLF (the sum of hour PLFs, which then ranges from 0 to 24) along two consecutive years of summer days. We have selected days of one season to avoid deviations coming from seasonal behaviour. The figure shows how after a week or two the process goes inside the 10% error band, respect to the expected value for that season.

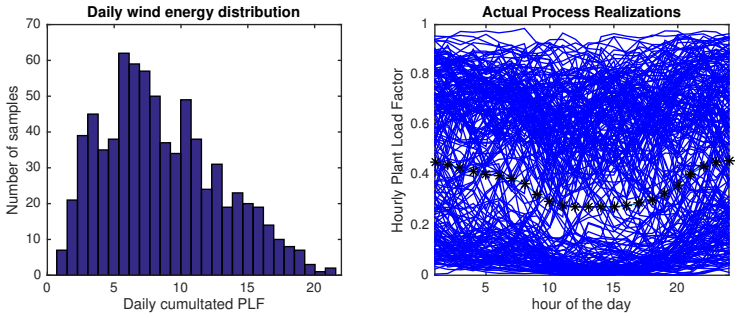


Fig. 2. Histogram of daily wind energy samples [leftmost] and 30% most atypical realizations for Uruguayan wind-power [rightmost]

Therefore, wind-power is fairly regular when used in medium-term planning. For shorter periods of the time, the situation is quite the opposite. The leftmost

of Figure 2 sketches the distribution of daily cumulated PLFs, while the rightmost part plots actual daily realizations of the process (blue curves) along one and a half years and the average PLF at each hour (black asterisks). Complementarily, there are approaches for short-term wind power forecasting based on numerical simulations of atmosphere's wind flows. For a day ahead period, or even larger time windows, numerical simulations are usually more accurate than purely statistical models. Figure 3 presents 72hs ahead forecasts (blue curves) and actual power series (red curve) for two samples within the actual dataset. These and other historical series are available at: http://www.ute.com.uy/SgePublico/ConsPrevGeneracioEolica.aspx.

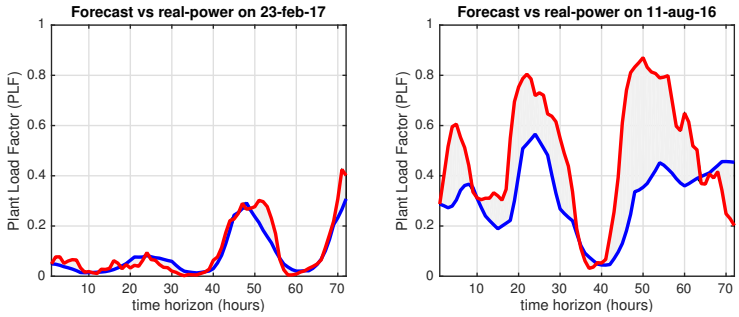


Fig. 3. Examples of 72hs forecasts (blue) and the actual power registered (red)

Although numerical simulations perform better than purely statistical methods to follow the process whereabouts at early stages, they are far from being trustworthy in what respects to the construction of likely scenarios at larger times. On the rightmost of Figure 3 there is an example where the difference of energy between forecast and actual processes (i.e. the grey area), accounts 57% of the average PLF for the period.

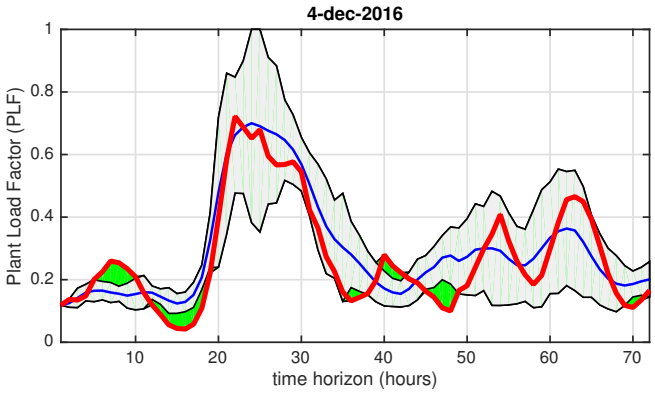


Fig. 4. A confidence band (grey) crafted after forecast and the actual process (red)

Besides assessing potential savings coming from using smart-grids, this work benchmarks the performance of deterministic and stochastic optimization models over the same test scenarios. Therefore, confidence bands were used to fence wind-power process with a high degree of certainty. Those bands were crafted up from the combination of three independent sets of forecasts and the correspondent actual power series. As an example, Figure 4 shows the confidence band for a particular day within the test-set. Bands were calibrated seeking for the average off-band energy (i.e. green areas in the figure) to be below 10% of the average PLF. Besides, bands are adjusted so less than 10% of the days violate the previous condition. The calibration whose average band width is minimal while fulfills the previous conditions, has an average width deviation respect to the centroid (i.e. blue curve) slightly above 10% of the average energy demand (the fact this final figure replicates the previous is just a coincide). The details of the technique used to craft these bands are documented in [9].

3 Optimal Short-term Optimization Model

This section describes the main entities of the Uruguayan electricity market and examples about how some of them are modeled, and how their instances are combined into a single optimization model.

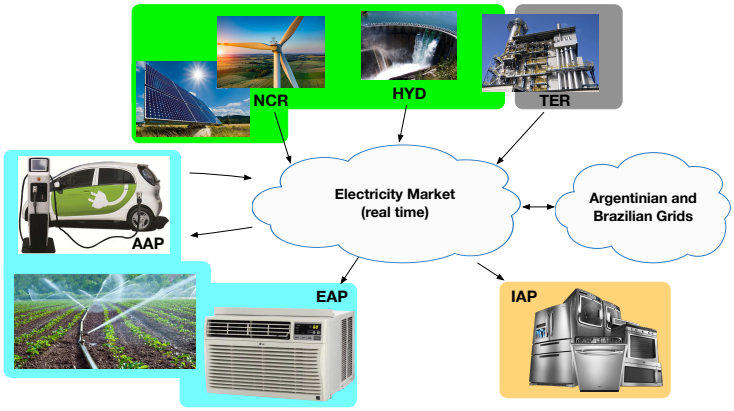


Fig. 5. Entities of the wholesale electricity market

Over the upmost part of Figure 5 is represented the power offer of the system. Renewable (green) energies comprise: wind and solar power (non-cumulative renewable / NCR), Hydroelectricity (HYD) and the Biomass, whose units are basically thermal generation plants (TER). The installed power plant is completed with fossil thermal generation units. Upon the rightmost-bottom of Figure 5 non-manageable demands are represented. They are typically associated (though not limited) to some residential appliances. Such inelastic appliances

(IAP) are considered hourly predictable demands over the time horizon to optimize, which is 72hs ahead in this work (i.e. the time horizon of wind-power forecasts). In other words, inelastic appliances impose a power requirement to the system. Variants of the basic model introduce: elastic applications (EAP) or active applications (AAP). Elastic applications are those where requirements are better expressed in terms of energy rather than power. A fraction of what they need could be expressed as a power constraint, but the idea is that substantial portions of the required energy within certain time windows could be either deferred or advanced into that window. Finally, in addition to being elastic, active applications can return power to the network when necessary. In all the models explored in this work, elastic and active applications are at the service of the system (i.e. social-welfare). We assume they can be remotely controlled, so as long as basic power requirements are fulfilled, the gaps of energy to complete those demands constitute control variables just as those of the installed power plant, and they are also used to get the most of the optimization.

3.1 Thermal Units

Each entity has a reference mixed-integer optimization sub-model or block. All these blocks combined and instantiated for a particular data-set define the whole optimization problem for that instance and variant. For example, Equation 1 is the framework to model simple thermal plants, labeled as *Other Thermal Units* in Table 1.

$$\begin{cases} \min\limits_{x_t^g, w_t^g} a\sum\limits_{t\in T} x_t^g + b\sum\limits_{t\in T} w_t^g + \alpha\sum\limits_{t\in T} y_t^g & & \\ m_{GT}\cdot x_t^g \le w_t^g, & t\in T & (i) \\ w_t^g \le M_{GT}\cdot x_t^g, & t\in T & (ii) \\ y_t^g \ge x_t^g - x_{t-1}^g, & t\in T & (iii) \\ 2x_t^g - 2x_{t+1}^g + x_{t+2}^g + x_{t+3}^g \ge 0, & t = 1,\ldots,T_m-3 & (iv) \\ 2x_t^g - 2x_{t+1}^g + x_{t+2}^g + x_{t+3}^g \le 2, & t = 1,\ldots,T_m-3 & (v) \\ x_t^g, y_t^g \in \{0,1\} & & \end{cases} \tag{1}$$

Boolean variables x_t^g indicate whether the unit g is active or not at the time moment t. The period of activation of a small thermal unit is bellow 10min, so it can be considered instantaneous for a time slot of one hour. Whenever active ($x_t^g = 1$) the power generated by each unit must be between technical minimum (m_{GT}) and maximum (M_{GT}) values. This is imposed with constraints (i) and (ii). Boolean variables y_t^g identify the instants of time t at which a unit g is activated, which is forced by constraint (iii). The terms in the objective function respectively correspond to: the hourly fixed cost of operation when the unit is active; the variable cost incurred by the level of power generated; and the operational costs incurred in by activating the unit, i.e., fuel expenditures for warming up the unit plus a maintenance share per operation cycles. Besides

of being costly in terms of maintenance, the process of frequently activating thermal units is not operationally friendly. Therefore, we added constraints to guarantee that once started, a unit should be active (for instance) at least 3 hours (constraints (iv)), and also to force it to be inactive for at least 3 hours after stopped (constraints (v)). The last sets of constraints should be complemented with boundary constraints when the initial or final activity states are inherited as part of the instance. Table 2 shows a possible set of parameters for those simple thermal units, for a particular oil price during 2016. We could not find public data to valuate parameters α.

Name of each Thermal Unit	Number of power subunits	Power (MW) min	Power (MW) max	a USD	b $\frac{USD}{MWh}$
Central Batlle (Motores)	6	6	60	0	82
Punta del Tigre: 1 to 6	6	90	288	7423	86
Punta del Tigre: 7 and 8	2	0.6	48	1619	88
Central Térmica Respaldo	2	40	208	6819	103

Table 2. Parameters for simple thermal units

Unlike simple thermal units, the *Combined Cycle Plant* (or CCC) has slow time commitments, of around four hours till full operation, so its start-up details should be integrated into the model. To model such type of unit we used four types of variables and over twenty types of constraints. Elaborating into those details would deviate the focus of this document, so they were intentionally left outside of the scope. Reference parameters are: $m_{GT} = 58$MW, $M_{GT} = 550$MW, $a = 5240$USD (hourly fixed cost), $b = 63$USD/MW (variable cost) and $\alpha = 5500$USD. Along the four hours it takes the CCC to attain its full operation, the plant gradually increases the output power following a predetermine ramp. During that ramp-up, the efficiency is lower, so b is 35% higher. Once in full operation condition, the CCC should not be stopped until four hours later (i.e. eight hours since started), and once stopped there should be a period of at least 6 hours until start it up again. The CCC is the most efficient among the thermal units. However, it is not always chosen by the optimization process because of its complex commitment times, which sometimes does not fit system needs.

3.2 Hydroelectric

A third of the installed power plant and a half of the energy produced in Uruguay still come from hydroelectricity. Hydroelectric dams are geographically distributed over the mid-north of the country, as sketched in Figure 6. Three of them are in tandem over an internal river (Río Negro), while the fourth, placed over the Uruguay River, is a binational joint project with Argentina. The main state variable of a hydroelectric dam is the volume of water in its storage lake. That volume determines the *head* (i.e., the height difference between the surface of the reservoir and the turbines). Control variables regard with how much water flows through the turbines, and how much is spilled. The higher the head, the most energy obtained by volume of water turbinated. Actually, this also depends on the level the river after the dam, which in Uruguayan low steep river

courses is highly dependent on the total flow itself (i.e. turbinated and spilled), so the production function is far from being linear. Natural influxes into the reservoir increase the volume of water in it, while turbinated water decreases it. Intuition suggests that production efficiency passes by keeping the head as high as possible, while waters flow turbines downwards. However, whenever the head surpasses a security threshold, water must be spilled. Spilling not only wastes the resource, but, as mentioned before, increases the level downstream, what reduces the efficiency for the fraction of water really passing through the turbines.

Hydroelectric power plant	Power	Empty	Influxes
Rincón del Bonete	148MW	20 weeks	Río Negro
Baygorria	108MW	1 day	Bonete's outflux 6hs earlier
Palmar	333MW	2 weeks	Yí river and Baygorria 10hs earlier
Salto Grande	1/2 1890MW	2 weeks	Uruguay river

Table 3. Parameters of the hydroelectric Uruguayan power plants

As it counts in Table 3 and can be observed in Figure 6, the sequence of dams over the Río Negro binds influxes of some dams with the outflux of the previous.

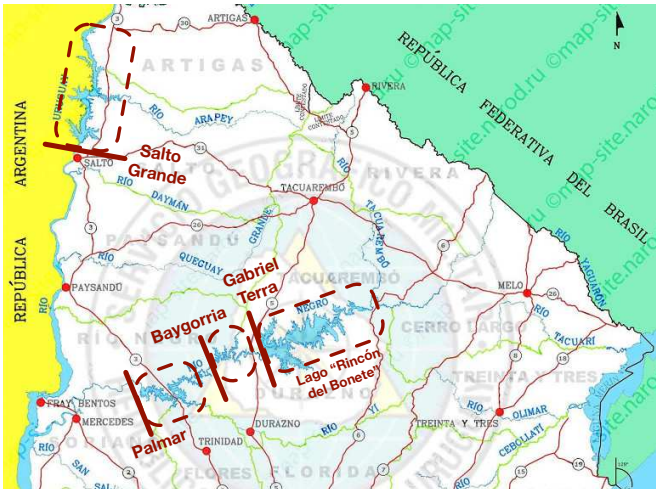


Fig. 6. Geographical distribution of hydroelectric dams in Uruguay

Table 3 also shows the emptying time when the unit is used at its maximum power. Within an optimization horizon of three days, control decisions hardly affect the efficiency (head or spilling) in Bonete, Palmar or Salto. Baygorria on the other hand must be finely tuned.

3.3 Storage batteries

Units of energy storage are modeled without an objective function, i.e., without a direct profit. So they are at the service of the system.

$$\begin{cases} b_t = b_0 + \delta \sum_{\tau=1}^{\tau=t} r_\tau^c - \sum_{\tau=1}^{\tau=t} r_\tau^d & (i) \\ 0 \leq r_t^c \leq \overline{r_c} & (ii) \\ 0 \leq r_t^d \leq \overline{r_d} & (iii) \\ 0 \leq b_t \leq \overline{b} & (iv) \end{cases} \tag{2}$$

The state variable b_t indicates the level of charge of the battery, i.e., the energy cumulated in it at time t. Control variables r_t^c and r_t^d indicate how much power is used at time t to respectively charge or discharge the battery. In the first case the power is taken from the grid (as a demand), while in the second is returned (as generation). There are upper limits for control and state variables. The parameter δ<1 represents the inefficiency (loss of power) of charge/discharge cycles. There are no storage units in the Uruguayan grid, so as a reference, we used parameters as in a real-world project ("Neoen & Tesla Motors" in Australia). They are: $\overline{r_c} = 35$MW, $\overline{r_d} = 100$MW, $\overline{b} = 140$MWh y $\delta = 0.9$.

3.4 Demands

Demands are the entities that bind all sub-problems into one. When demands are hourly determined, they form part of the data-set of the instance and are integrated into problem as set of T constraints: $\sum_{g \in G} w_t^g \geq d_t$, $t \in T$. Being T the number of hours along which we are optimizing, d_t the expected demand at the hour t, G the set of generation units and w_t^g the power produced by the unit g at time t (plus storage's uncharging). In more general terms, consider an application j in a set of applications J, and A^j a set of c_j disjoint time intervals $A^j = \{A_1^j, \ldots, A_{c_j}^j\}$ proper of that application. Let D_p^j be the energy requirement of the application j along the p^{th} interval ($1 \leq p \leq c_j$), and consider the control variable z_t^j, the power supplied by the grid to fulfill demand j at hour t. Besides, let $\underline{z}_t^j$ and $\overline{z}_t^j$ respectively be the lower and upper power bounds. Expressed so, an elastic demand is satisfied whenever constraints in Equation 3 are satisfied.

$$\begin{cases} \sum_{t \in A_p^j} z_t^j \geq D_p^j, & 1 \leq p \leq c_j, j \in J \quad (i) \\ \underline{z}_t^j \leq z_t^j \leq \overline{z}_t^j & \forall t \end{cases} \tag{3}$$

The new power balance condition is $\sum_{g \in G} w_t^g \geq \sum_{j \in J} z_t^j$, for every $t \in T$. Observe that traditional (hourly fixed) demands can be easily expressed using $A = \{1, \cdots, T\}$ and setting $D_t = d_t$. In this document we derive two flavors from this general model for demands. One of them is the traditional, where there is only one kind of demand, whose hourly requirements are known. In the other, we assume that 30% of the residential demand is elastic within each day. Almost 52% of the total energy in Uruguay is dispatched for residential use. So, power demand is first disaggregated between residential (d_t^R) and large scale energy consumers (d_t^L). Next, we set $\underline{z}_t = 0.7 d_t^R + d_t^L$, $\overline{z}_t = \infty$, $A = \{A_1, A_2, A_3\}$ where

$A_1 = \{1, \ldots, 24\}$, $A_2 = \{25, \ldots, 48\}$ and $A_3 = \{49, \ldots, 72\}$. Finally, we assign $D_1 = \sum_{t=1}^{24} 0.3 d_t^R$, $D_2 = \sum_{t=25}^{48} 0.3 d_t^R$ and $D_3 = \sum_{t=49}^{72} 0.3 d_t^R$.

4 Experimental Results

In addition to opening models by demand elasticity, we branch them by using deterministic or stochastic versions of the problem. So the number of versions totalizes four. Since solar power was incipient by the time this work was being developed, we only consider uncertainties coming from wind-power. In every case, confidence bands (see Figure 4) are used to bound process realizations. Deterministic versions assume the wind power will be as the centroid of the band (blue curve in Figure 4). Stochastic versions use the classic stochastic programming framework (see [6]) with four stages. Time intervals (in hours) for each stage are: [1,6], [7,24], [25,48] and [49,72]. Assuming a power assimilation preprocessing, forecasts are proven accurate during the first six hours (see [1]), so we can model stage-1 as deterministic. For the rest of the stages, trajectories are built to explore the confidence bands in order to reproduce different realizations. For stochastic programming versions of the problems we used 27 trajectories. In summary, for each representative scenario four versions of the problem are solved. They are defined by combining "inelastic" or "elastic+inelastic" demands, in their deterministic or stochastic versions. Historical data about actual dispatch is not available (they are considered confidential by authorities). However, since the historical information for the actual wind-power is available, we tested the convenience of the optimal schedule crafted, by comparing it with results of simulations of the real cost the system would have incurred in by using that plan as a guide. We remark that no algorithm was developed to tackle down these problem instances, since all of them were solved using a generic comercial MIP optimizer: *IBM(R) ILOG(R) CPLEX(R) Interactive Optimizer 12.6.3.0*, on an *HP ProLiant DL385 G7* server with *24 AMD Opteron(tm) 6172* processors, 72GB of DDR3 RAM and running *CentOS 6.10* Linux operating system.

4.1 Problem Instances

Instances were defined up from scenarios particularly interesting to analyze sensibility against some key aspect the problem. Due to the importance of hydroelectric energy for the country, the availability of hydraulic resources is one the dimensions to explore. We defined five hydro-scenarios to test, they are as follows. *HB1* is the historically typical scenario, with a good head of water in the reservoirs and high expectations of new influxes the next weeks to come. *SH1* assumes a drought condition, with medium resources in the reservoirs and poor expectations about the new influxes. *SH2* is a worse drought condition than in SH1, since now the head level in reservoirs is critical. *EHT1* is an intermediate situation to HB1 and SH1. Resources are good but important new influxes are unlikely, so the valuation of the water (that comes from mid-term planning models) pushes prices towards those of fossil fuels. The valuation gives lowest

prices for those reservoirs over Río Negro. *EHT2* is similar to EHT1, but now Salto Grande reservoir has lower prices than those of Río Negro. Although not representative regarding the typical volume of rains in a year, SH1, SH2, EHT1 and EHT2 are important to stress the model. The second dimension for scenarios is defined by the second power source by importance: the power-wind. We selected four "forecasts+actual power" among the set of historical series.

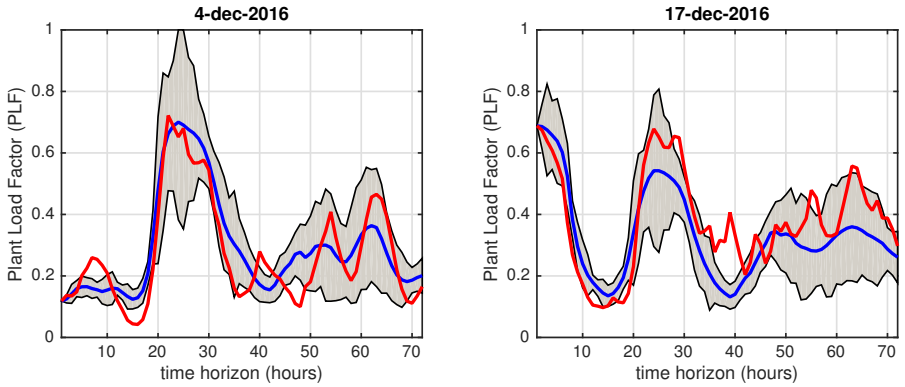


Fig. 7. Representative wind-power samples

Days in Figure 7 were chosen because they are typical, i.e., they are close to the medians of: off-band error, effective wind-power produced, and width of their confidence band. Days in Figure 8 on the other hand were chosen to stress the model. The leftmost sample for having the confidence band with the larger width, and the rightmost one for being among the samples with the higher off-band energy, i.e., for being among those bands with the poorest performance.

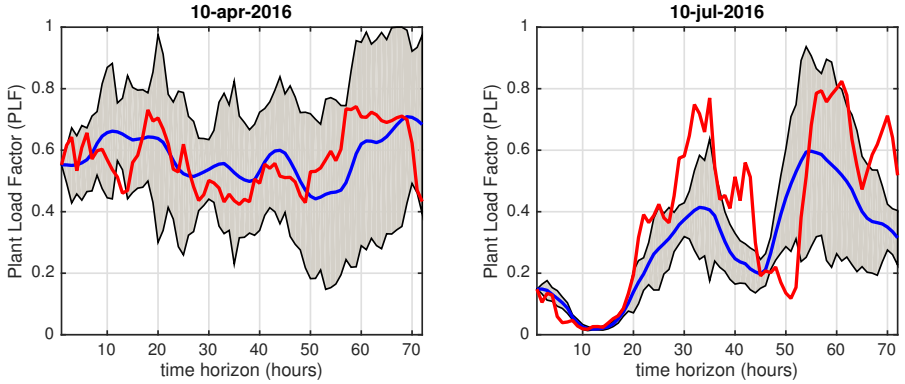


Fig. 8. Stressing samples regarding forecast and wind-power series

In addition, the last sample has a particularity regarding power. Observe that in the period between the hour 51 and 54 rises almost 70% of the PLF, which rounds 1GW, close to the average power consumption of the country.

Therefore, 80 problems were solved to explore those scenarios over different models (4 models × 5 hydro-scenarios × 4 wind-scenarios). In the first place, we show the results for the deterministic models over all hydro and wind scenarios.

	4-dec	17-dec	10-apr	10-jul
Inelastic Demand	348,930	334,760	241,230	359,730
Elastic Demand	327,200	311,240	239,350	344,780

Table 4. Cost [USD] deterministic optimization 72hs ahead. [HB1]

Complementing the information in Table 4 and Table 5, we must add that after simulating the system dispatch using actual wind-power values, the absolute difference between the projected schedule and the simulation of the operation was between 3% and 6%.

	EHT1				EHT2			
	4-dec	17-dec	10-apr	10-jul	4-dec	17-dec	10-apr	10-jul
Inelastic Demand	5,389	5,120	3,737	5,448	4,091	3,869	2,850	4,126
Elastic Demand	5,281	5,026	3,660	5,338	3,951	3,761	2,667	3,958

	SH1				SH2			
	4-dec	17-dec	10-apr	10-jul	4-dec	17-dec	10-apr	10-jul
Inelastic Demand	5,696	5,419	3,857	5,731	5,706	5,428	3,857	5,742
Elastic Demand	5,602	5,316	3,735	5,630	5,621	5,337	3,735	5,646

Table 5. Cost [thousands of USD] deterministic optimization 72hs ahead

Instances for hydro-scenario HB1 do not require the usage of thermal generation. This fact explains the low production costs. Conversely, several thermal units are to be activated in hydro-deficient scenarios EHT1, EHT2, SH1 and SH2, then costs increase over the order of magnitude. Observe that although costs and other conditions are similar, the system manages much more efficiently hydro-scenarios ETH2 than their homologous in EHT1, whose figures are similar to those of SH1 and SH2.

	4-dec	17-dec	10-apr	10-jul
Inelastic Demand	-0.01%	-0.24%	-0.12%	-0.09%
Elastic Demand	0.18%	-0.01%	-1.00%	-0.21%

Table 6. Relative deviation stochastic vs deterministic models [HB1]

Regardless of the hydro-scenario or demand elasticity, Apr/10/2016 always gets the lowest cost, with reductions in the order of 30%. That date corresponds with three windy days in a row and evinces how sensible the system cost is to the power coming from wind farms.

Focusing now on the expected cost for stochastic versions, the values are quite similar to the corresponding deterministic instance, so Table 6 and Table 7 present the relative difference with respect to figures in Table 4 and Table 5.

	EHT1				EHT2			
	4-dec	**17-dec**	**10-apr**	**10-jul**	**4-dec**	**17-dec**	**10-apr**	**10-jul**
Inelastic Demand	-0.28%	-0.29%	-0.19%	-0.13%	-0.45%	-0.21%	-1.41%	-0.30%
Elastic Demand	-0.42%	-0.41%	-0.36%	-0.10%	-0.44%	-0.34%	-0.25%	-0.14%

	SH1				SH2			
	4-dec	**17-dec**	**10-apr**	**10-jul**	**4-dec**	**17-dec**	**10-apr**	**10-jul**
Inelastic Demand	-0.34%	-0.33%	-0.04%	-0.09%	-0.33%	-0.34%	0.00%	-0.10%
Elastic Demand	-0.51%	-0.45%	0.05%	-0.02%	-0.50%	-0.47%	0.09%	-0.01%

Table 7. Relative deviation stochastic vs deterministic models

Observe that in 36 out of 40 instances, the stochastic version gets schedules with lower expected values than those of the deterministic version. This fact by itself is not relevant, however, a-posteriori simulations run to assess models' robustness, show that differences between projected schedules and simulations are always under 3.5% for the stochastic version. Thus, the stochastic version is not only better in quality but in condidence, so we use its figures as a reference to valuate the benefits of having smart-grids capabilities to control up to 30% of the residential demand of energy. Those figures show that having such control allows to reduce costs in all the hydro-scenarios: 4.7% (HB1), 3% (EHT1,2) y 2.1% (SH1,2). Saving are relative higher in the hydro standard HB1 scenario, but in absolute terms are much higher in those of drought. If all those savings were transferred to elastic demands, reductions of price could round 25%.

5 Conclusions and Future Work

This document presents how classical optimization models were used to quantify the benefits of having smart-grids technologies, a fundamental component of smart-cities. Such benefits were computed upon a real-world scenario, the Uruguayan electricity market, a world leader in the usage of renewable energies, which is facing the challenge of getting over 35% of its electricity from wind-power, a volatile source of energy.

Experimentation was realized assuming that 30% of the residential demand can be controlled, showing that if billed differentially, discounts could round 25%. Large scale energy consumers can trade in the wholesale electricity market according on their needs. Residential users however, must contract with the public owned company (UTE), so a centralized mechanism as that described in this document is viable in Uruguay.

Regarding the particulars of the dispatch schedules, their results show that smart-grids not only allow to reduce production costs, but also softness the stress

to operate the grid. A secondary but highly desirable consequence of controlling demands to reduce costs, is that the set of components necessary to provide power to the grid, is lower than in regular conditions. In addition, there are fewer cycles of activation/deactivation of components. As a consequence, spot prices are also more regular for smart-grid based dispatch schedules, turning the wholesale market less volatile for all of the users.

Experiments realized so far are punctual, and simulate specific days taking its parameters from historical data sets. A promising line of work consists in expanding the software components developed so far, to run instances along larger periods of time. Hence, historical information could be used to evaluate results over months or years. The analysis of the solutions shows that most of the savings are consequence of a better use of hydraulic resources. Therefore, it is probable that the sustained application of such controls makes the system more immune against falling in drought conditions, in which costs are much higher. Another line of future work is the integration of solar-power among the sources of uncertainty.

References

1. de Mello, S., Cazes, G., and Gutiérrez, A. Operational wind energy forecast with power assimilation. In *14th International Conference on Wind Engineering* (2014).
2. Joos, M., and Staffell, I. Short-term integration costs of variable renewable energy: Wind curtailment and balancing in britain and germany. *Renewable and Sustainable Energy Reviews 86* (2018), 45 – 65.
3. Karki, R., and Billinton, R. Cost-effective wind energy utilization for reliable power supply. *IEEE Transactions on Energy Conversion 19*, 2 (June 2004), 435–440.
4. Li, N., Chen, L., and Low, S. H. Optimal demand response based on utility maximization in power networks. In *2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting* (July 2011), pp. 1–8.
5. Mohsenian-Rad, A. H., and Leon-Garcia, A. Optimal residential load control with price prediction in real-time electricity pricing environments. *IEEE Transactions on Smart Grid 1*, 2 (Sept 2010), 120–133.
6. Morales, J. M., Conejo, A. J., Madsen, H., Pinson, P., and Zugno, M. *Integrating Renewables in Electricity Markets*. No. 1 in 205. Springer US, 2014.
7. Paganini, F., Belzarena, P., and Monzón, P. Decision making in forward power markets with supply and demand uncertainty. In *Information Sciences and Systems (CISS), 2014 48th Annual Conference on* (March 2014), pp. 1–6.
8. REN21. Renewables 2018 global status report. Tech. rep., Paris: REN21 Secretariat, 2018.
9. Risso, C., and Guerberoff, G. Nonparametric optimization of short-term confidence bands for wind power generation. *ArXiv e-prints* (May 2018).

“Ciudadanía consciente”: uso de huertos ecológicos como espacios de formación en cuestiones medioambientales y alimentarias

Guadalupe Ramos-Truchero[1] [0000-0003-1292-6524] y Marcia Eugenio[2*] [0000-0002-7907-9780]

[1] Universidad de Valladolid, Facultad de Educación de Soria, Dpto. Sociología y Trabajo Social. Campus Duques de Soria. 42004 Soria
[2*]Universidad de Valladolid, Facultad de Educación de Soria, Dpto. Didáctica Ciencias Experimentales, Sociales y de la Matemática. Campus Duques de Soria. 42004 Soria.
*marcia.eugenio@uva.es

Abstract. Se presenta un análisis cualitativo de los diarios de alumnos universitarios que participaron en una experiencia educativa basada en el uso de un huerto ecológico, en un contexto de enseñanza de las ciencias en formación inicial de maestros. Los resultados muestran cómo esta experiencia supone aprendizajes sobre cuestiones medioambientales, en particular de valoración del entorno y de conductas pro-ambientales, y también sobre cuestiones del ámbito agroalimentario, en particular comprensiones más profundas del significado e implicaciones de la actividad agrícola, que además se han vivenciado desde la motivación hacia esta experiencia educativa novedosa, y con emociones de bienestar y satisfacción. Dada la relevancia de estas cuestiones en relación a la formación de la nueva “ciudadanía consciente”, proponemos la presencia y el uso de huertos ecológicos como espacios de formación.
Keywords: Educación Superior, investigación cualitativa, ciudadanía consciente.

1 Introducción

El movimiento de huertos educativos de los Estados Unidos se inició en la década de 1990, fundamentalmente en centros de Educación Primaria y, en menor grado, también en centros de Educación Secundaria, en respuesta fundamentalmente a dos cuestiones: la mejora del rendimiento académico de los estudiantes en las áreas de ciencias [1][2] y el aumento del consumo de frutas y verduras, vistas las altas tasas de incidencia de obesidad y trastornos relacionados con la alimentación, como diabetes tipo B, en la población infantil y juvenil [3][4]. Tanto es así, que son habituales los programas destinados a apoyar económica y curricularmente el establecimiento, mantenimiento y uso educativo de huertos en muchos estados [5][6] y que, en algunos de ellos, hasta el 25% de centros educativos contaban con un huerto hace ya una década [7]. Existen estudios de revisión, como el de Blair [8] y, más específicamente, el de [9], que recogen impactos positivos del uso de huertos sobre el comportamiento alimentario.

También en España los huertos educativos han proliferado desde hace un par de décadas, fundamentalmente en centros de Educación Primaria, aunque quizás con finalidades no tan definidas. Constituyen a menudo espacios recreativos no siempre bien empleados desde un punto de vista didáctico, o por el contrario, una seña de identidad en escuelas de pedagogías alternativas o escuelas públicas comprometidas con el medio ambiente y la sostenibilidad. Recientemente, se están implementando huertos ecológicos (manejados mediante técnicas de permacultura o cultivo biointensivo, por ejemplo) como innovación docente en Educación Superior, y se ha generado en torno a ellos un movimiento, el de los *Huertos EcoDidácticos*, que defiende su utilidad y versatilidad en relación a una variedad de finalidades [10]. En particular, se consideran recursos valiosos para la enseñanza de las ciencias naturales en formación inicial de maestros, por ejemplo en la Universidad de Cádiz [11] , la Universidad de Valladolid [12] o la Universidad del País Vasco [13].

Sin embargo, el uso de los huertos ecodidácticos también tiene su aplicación en el marco de la educación cívica y democrática, derivado de la extensión de la formación e información en valores medioambientales [14]. Se trata de un recurso educativo importante, a tener en cuenta en la articulación política de la concepción de una nueva ciudadanía ya que, a través de las acciones que se llevan a cabo en los estudios universitarios, se contribuye a la información sobre cuestiones medioambientales y a la formación de ciudadanos conscientes y responsables. El trabajo que presentamos se centra en la construcción de *ciudadanía ecológica* y *alimentaria* a partir de una asignatura de ciencias naturales en la formación inicial de maestros de educación infantil. El objetivo si el uso del huerto ecológico como recurso educativo en este contexto contribuye a la formación de estudiantes-ciudadanos-consumidores conscientes y participativos, adaptados a una nueva concepción de ciudadanía, propia de la sociedad reflexiva en la que vivimos.

2 Ciudadanía consciente y formación universitaria

La ciudadanía es un concepto político, que se define como un conjunto de derechos (civiles, sociales y políticos) y de obligaciones, mediante los cuales los individuos son reconocidos como miembros de una comunidad política en condiciones de igualdad, de tal manera que sirven para relacionar al individuo con el poder público. En otras palabras, podríamos decir que la ciudadanía es un concepto multinivel que implica cuatro dimensiones: derechos, responsabilidades, participación y pertenencia o identidad.

Las reflexiones en torno a la ciudadanía y al alcance de sus dimensiones ha sufrido un fuerte impulso en las últimas dos décadas. Los profundos cambios políticos, culturales, económicos y ambientales han trasformado las condiciones sobre las que se construyó el concepto de ciudadanía, obligando a actualizarla y a incorporar nuevas conceptualizaciones con el objetivo de responder al mundo actual de la era global.

La primera de estas transformaciones obedece a la internacionalización y globalización de las sociedades contemporáneas, que han transformado la idea de comunidad política sobre la que aplica la ciudadanía. Esta que, tradicionalmente, se había susten-

tando bajo los límites del Estado-nación, ya no puede situarse única y exclusivamente en ellos, pues los procesos económicos, políticos y medioambientales son transnacionales y esto supone otorgar a la ciudadanía un carácter global o cosmopolita.

Estos mismos cambios surgen, en segundo lugar, por el paso de una sociedad moderna a una sociedad reflexiva, donde la idea de participación dentro de una comunidad política se expresa de una manera consciente y activa [15]. Los ciudadanos perciben la política como un sistema de gobernanza donde ellos mismos juegan un papel activo y asumen una responsabilidad frente a los riesgos de una manera reflexiva y consciente ("subpolítica").

En todo ello, el mercado se configura como el nuevo espacio en el que participar políticamente y, a través del cual, transmitir las preocupaciones o reivindicaciones éticas, medioambientales o políticas, ejerciendo la ciudadanía a través del consumo político y responsable. Emerge, así, la figura de un *consumidor* (ciudadano) *consciente*, definido como aquel que convierte su hábito de compra en hábito político, tanto a través de sus acciones individuales, como mediante su participación en movimientos sociales. Del mismo modo, este ciudadano-consumidor tiene en cuenta las consecuencias públicas de su consumo privado y trata de usar el poder de compra para lograr que se produzca un cambio social o político.

Por último, a esta nueva concepción de ciudadanía se une el surgimiento de nuevas dimensiones de ciudadanía derivadas del giro hacia la reflexión y de la responsabilidad que los ciudadanos tienen de sus propios actos. Dos de las cuestiones que han desembocado en nuevas formas de ciudadanía derivan del medio ambiente y la alimentación. Gómez Benito y Lozano [16], siguiendo las palabras de Valencia Sáiz [17] afirman que, de la misma manera que no puede existir la democracia sin ciudadanos democráticos, no puede haber sociedad sostenible sin ciudadanos ecológicos, ni puede haber una alimentación sostenible sin "ciudadanos alimentarios".

En este sentido, la *ciudadanía ecológica* se define como una nueva forma de ciudadanía que se refiere, más que a los derechos del ciudadano, a las obligaciones y responsabilidades respecto al medio ambiente. Dichas obligaciones se caracterizan por estar dirigidas principalmente a desconocidos, distantes tanto en el tiempo como en el espacio (generaciones futuras), y que implican el cuidado tanto en el ámbito privado como público y más allá del Estado-nación [18].

Estrechamente vinculada, se encuentra la *ciudadanía alimentaria*, noción que se refiere a la necesidad de construir una alimentación sana, suficiente, de calidad, sostenible y justa. El mercado de alimentos está mundializado y el sistema agroalimentario está dominado cada vez más por poderosas macro-corporaciones y por conflictos de intereses entre distintos actores. Todo ello pone de relieve la necesidad de fomentar un acceso a información veraz que permita a los ciudadanos ejercer conscientemente sus elecciones de consumo.

En síntesis, la ciudadanía se expresa en el plano de la conciencia -el conocimiento, la preocupación, el interés – de las actitudes hacia el medio ambiente y su regulación, en los comportamientos privados y públicos. En definitiva, nos encontramos ante una nueva concepción de ciudadanía que, básicamente, se caracteriza por tres cuestiones: por tener un carácter global, por tratarse de una ciudadanía consciente, y por estar vinculada a nuevas dimensiones, como la *ciudadanía ecológica* y la *alimentaria*.

Cualquier articulación política de esta nueva ciudadanía multinivel pasa por la inclusión de estas cuestiones en el sistema educativo. Valencia Sáiz plantea que una de las áreas fundamentales de la articulación política y social de la *ciudadanía ecológica* debe ser impulsar programas, contenidos y asignaturas que fomenten los valores medioambientales en todos los niveles del sistema educativo, y también realizar una labor de información y difusión de los problemas ambientales[19]. Del mismo modo, los programas de educación alimentaria juegan un importante papel en la formación de consumidores activos e informados que participen de la configuración de un sistema alimentario a nivel local, regional, nacional y global. En este sentido, distintos autores constatan que el nivel de estudios es un rasgo esencial para la emergencia de los *consumidores conscientes y responsables* [20].

3 Métodos

La investigación se llevó a cabo en una asignatura de ciencias naturales, en el contexto de la formación inicial de maestros de infantil. En la asignatura se empleó como eje integrador un huerto ecológico, donde transcurrieron sesiones prácticas. Los estudiantes realizaron una serie de tareas, como alimentar, voltear y regar el compostero; alimentar y regar el vermicompostero y cribar el vermicompost; sembrar, plantar, acolchar, gestionar adventicias y plagas, poner y quitar mantas térmicas, cosechar, etc. Además, se llevaron a cabo talleres y experiencias en laboratorio sobre algunos componentes o procesos del huerto, como un taller de remedios para tratar plagas, la medición del pH de suelos o la identificación de mesofauna en el vermicompost.

Tras las sesiones en el huerto, los estudiantes debían mantener un diario, respondiendo a las siguientes cuatro cuestiones: ¿Qué he hecho hoy en el huerto?, ¿Qué he aprendido?, ¿Cómo me he sentido? y ¿Qué me ha gustado más? De este modo, el diario de huerto ofreció un registro individual tanto de las actividades que cada alumno llevó a cabo en el huerto en cada una de las sesiones, como de sus reflexiones en cuanto a los aprendizajes, sensaciones y emociones asociadas a ellas. Se seleccionaron y analizaron un total de 15 diarios, en base a un sistema de categorías establecido por las investigadoras, en parte a priori -en relación con los objetivos de investigación inicialmente establecidos- y en parte a posteriori, a partir del examen del discurso. Los diarios se codificaron y analizaron con el software de análisis cualitativo de datos MAXQDA v.12.

4 Resultados y Discusión

Presentamos a continuación los resultados relativos a tres de las categorías que se distinguieron, por su contribución a la *ciudadanía ecológica* y *alimentaria*: aspectos emocionales, medio ambiente y agricultura y alimentación. En relación a la primera, se había definido un objetivo de investigación consistente en comprobar si el uso de un huerto ecológico como recurso educativo resultaba motivador para los estudiantes. Sin embargo, las otras dos categorías emergieron del discurso de los propios estudian-

tes, en sus diarios, no respondiendo a objetivos de investigación originalmente planteados.

La motivación y algunas emociones constituyeron un aspecto muy destacado en los diarios, sobre los que hubo un total de 262 referencias. Los estudiantes consideraron la actividad en el huerto como motivadora, entre otros motivos por ser novedosa, y manifestaron expectativas positivas al respecto, por ejemplo:

(...) me he sentido emocionada y motivada, ya que es un tipo de actividad distinta a la que no estamos acostumbrados en la universidad y que realmente puede ser efectivo a la hora de aprender. (D11)

También mencionaron que la experiencia en el huerto les permitió desconectar de sus preocupaciones diarias y sentir bienestar, algo sin duda positivo:

Sentimientos de tranquilidad y relajación, sobre todo. He escuchado con frecuencia a las personas que cuidan de un huerto que esta es una actividad que les relaja y les evade de otros pensamientos, y creo estar totalmente de acuerdo. (D02)

Y fueron abundantes las alusiones a emociones de satisfacción, particularmente en relación a la evolución del huerto con el tiempo y al papel que en ello juegan los estudiantes:

Lo que más me ha gustado ha sido ver el gran cambio que ha experimentado el huerto (...) esto es gratificante porque además lo hemos hecho nosotros con nuestras propias manos (...). (D11)

En los diarios se encontraron 74 referencias a aspectos relacionados con el medio ambiente. Entre ellas predominaron las descripciones de conductas pro-ambientales estrechamente vinculadas al mantenimiento y cuidado del propio huerto, que, de algún modo, hicieron a los estudiantes tomar conciencia de sus hábitos con una actitud reflexiva y de responsabilidad, por ejemplo:

Me he encargado junto con otra compañera de la limpieza del huerto, hemos ido retirando todos los residuos que encontrábamos por el huerto y la ladera, hemos encontrado botellas, latas, papeles, cables de la luz…Y lo hemos llevado al contenedor más cercano. (D11)

También hubo alusiones al hecho de que el trabajo en el huerto había aumentado su valoración del entorno, es decir, les había hecho tomar conciencia de su importancia para la vida y el bienestar humanos, como por ejemplo:

(...) ha fomentado el respeto por la tierra como fuente de vida y desarrollar el interés por no degradarla. (015M)

Sin duda, estas reflexiones están configurando una "ética del cuidado de la naturaleza" y de la búsqueda de soluciones a los problemas medioambientales, conectando la educación con la *ciudadanía ecológica* a través del huerto como recurso para la enseñanza de las ciencias y también como instrumento de concienciación.

El huerto es, de hecho, un recurso didáctico que se valora muy bien desde las distintas corrientes de la Educación Ambiental, como la Educación para la Sostenibilidad [21][22][23] o la Educación para el Decrecimiento [24].

Los estudiantes también incorporaron a sus relatos aspectos relacionados con la agricultura y la alimentación, aunque no se había incidido educativamente ni preguntado explícitamente por ellos; en total, se contabilizaron 47 referencias. El huerto les

ayudó a valorar el trabajo agrícola y a las personas que se encuentran dedicadas a la agricultura, por ejemplo:

> *Me he dado cuenta, por fin, de todo el trabajo e implicación que un huerto supone (...)* (D02)
>
> *En verano siempre veía a los habitantes de los pueblos recoger sus cosechas la mar de orgullosos y, sinceramente no entendía muy bien a qué se debía tal gratitud. Ahora lo comprendo a la perfección.* (D15)

La experiencia en el huerto educativo actuó como vínculo con experiencias agrícolas familiares previas sobre las que quizás no se había reflexionado, o a las que no se había concedido importancia hasta entonces, y que se revisitaron:

> *(...) me sirve como reflexión para agradecer a mi tío el esfuerzo que realiza, el mimo con el que hace cada cosa y la satisfacción que se siente al dejar las cosas bien hechas y a la espera de que prosperen. (...) nunca me había percatado de cómo se cultiva, o cómo hay que cuidarla. (...).* (D02)

Por último, es importante señalar que aparecieron reflexiones en relación a la conciencia sobre la importancia de una alimentación saludable, un rasgo de la *ciudadanía alimentaria*, tanto desde la toma conciencia de los derechos como de las obligaciones y la participación [25], por ejemplo:

> *He aprendido a valorar la importancia del consumo de alimentos frescos y saludables, cultivados con respeto al medio ambiente.* (E015M)

Estos aspectos nos hacen pensar que los huertos educativos podrían están jugando un importante papel en la configuración de la *ciudadanía ecológica y alimentaria* entre los estudiantes, si se emplean como recurso para la adquisición de valores, actitudes y conductas pro-ambientales, y de normas, hábitos de consumo y comportamientos alimentarios saludables y responsables.

5 Conclusiones

El análisis de los diarios de los futuros maestros en formación inicial sobre las actividades, aprendizajes, preferencias y emociones que vivieron durante las sesiones transcurridas en el huerto ecodidáctico de su Facultad desvela que el uso de este espacio de formación conlleva varias dimensiones que son muy relevantes para la formación ciudadana en relación a aspectos de sostenibilidad ambiental y alimentaria. El huerto es un contexto de la vida real, significativo para el estudiante, al que conecta vivencias previas y en el que desarrolla sus conductas y actitudes en relación al medio ambiente, y su conciencia sobre agricultura y alimentación. El huerto, además, es un espacio donde estos aprendizajes conllevan motivación y emociones positivas como bienestar y satisfacción, que son muy relevantes desde el punto de vista educativo.

La actividad agrícola, que determinó el asentamiento de las comunidades humanas en núcleos estables y que ha estado integrada en el tejido urbano desde el origen mismo de las ciudades, ha ido quedando confinada, con el aumento del tamaño de los núcleos urbanos, la industrialización y el auge del sector servicios, a los espacios periurbanos y las zonas rurales, desterrándose así del entorno cotidiano de los habitan-

tes de la ciudad. Además, ese alejamiento físico ha tenido también repercusiones sobre la esfera emocional y de los valores, pasando la actividad agrícola a ser percibida como ajena, y a cargo de personas humildes y sin formación académica.

En la actualidad, la recolonización del espacio urbano por parte de los huertos, sean de tipo social o educativo, también discurre paralela a un proceso de acercamiento emocional y de valores a la actividad agrícola. Los huertos urbanos se convierten en espacios desde los que ejercer la participación ciudadana: suponen recreo y entretenimiento sin necesidad de gasto económico (consumismo), constituyen espacios de inclusión social frente a situaciones de desempleo y desvertebración, materializan y promueven la conciencia ambiental de los ciudadanos, y pueden catalizar su activismo social. En algunos entornos concretos, revisten de importancia en relación a la seguridad alimentaria, pues proveen de alimentos, contribuyendo así a combatir la subnutrición y la pobreza. Por último, desarrollan conciencia sobre la producción de alimentos y sus implicaciones ambientales, así como sobre hábitos de alimentación.

En este trabajo se ha evidenciado cómo un huerto ecológico constituye un espacio de formación muy valioso en un contexto universitario en relación a cuestiones de sostenibilidad ambiental y agrícola-alimentaria. Extrapolando este uso del recurso al ámbito espacial de la ciudad y al público de la ciudadanía, se podría contribuir de forma valiosa a la formación de ciudadanos conscientes y activos sobre los actuales problemas ambientales y alimentarios.

6 Agradecimientos:

Este trabajo de innovación e investigación educativa se desarrolló en el marco del Proyecto de Innovación Docente de la convocatoria 2017 de la Universidad de Valladolid: “Huertos EcoDidácticos: nuevos espacios educativos para la Educación para la Sostenibilidad”. Las autoras agradecen también a la Red Temática de la CYTED “CIUDADES INTELIGENTES TOTALMENTE INTEGRALES, EFICIENTES Y SOSTENIBLES (CITIES)”, nº 518RT0558.

References

1. DeMarco, L. W., Relf, D., McDaniel, A.: Integrating Gardening into the Elementary School Curriculum. HortTechnology, 9(2), 276-281 (1999).
2. Klemmer C.D., Waliczek, T.M., Zajicek, J.M.: Growing Minds: The Effect of a School Gardening Program on the Science Achievement of Elementary Students. HortTechnology, 15(3), 448-452 (2005).
3. Parmer, S.M., Salisbury-Glennon, J., Shannon, D., y Struempler, B.: School Gardens: An Experiential Learning Approach for a Nutrition Education Program to Increase fruit and Vegetable Knowledge, Preference, and Consumption among Second-grade Students. Journal of Nutrition Education and Behavior, 41(3), pp. 212-21 (2009).

4. Robinson-O'Brien, R., Story, M., Heim, S.: Impact of Garden-Based Youth Nutrition In-tervention Programs: A Review. Journal of the American Dietetic Association, 109(2), 273-279 (2009).
5. Hazzard E.L., Moreno E., Beall D.L., Zidenberg-Cherr S.: Best Practices Models for Im-plementing, Sustaining, and Using Instructional School Gardens in California. Journal of Nutrition Education and Behavior, 43(5), 409-413 (2011).
6. Robinson-O'Brien, R., Story, M., Heim, S.: Impact of Garden-Based Youth Nutrition In-tervention Programs: A Review. Journal of the American Dietetic Association, 109(2), 273-279 (2009).
7. Graham H., Lane Beall D., Lussier M., McLaughlin P., Zidenberg-Cherr S.: Use of School Gardens in Academic Instruction. Journal of Nutrition Education and Behavior, 37, 147-151 (2005).
8. Blair, D.: The child in the garden: An evaluative review of the benefits of school gar-dening. Journal of Environmental Education, 40(2), 15-38 (2009).
9. Davis, J.N., Spaniol, M.R., Somersel, S.: Sustenance and sustainability: maximizing the impact of school gardens on health outcomes. Public Health Nutrition, 18(13), 2358-2367 (2015).
10. Eugenio, M., Aragón, L.: Experiencias educativas en relación a la Agroecología en la Edu-cación Superior española contemporánea: presentación de la Red Universidades Cul-tivadas (RUC). Agroecología 11, 31-39 (2017).
11. Aragón, L., Cruz, M.I.: ¿Cómo es el suelo de nuestro huerto? El Aprendizaje Basado en Problemas como estrategia en Educación Ambiental desde el Grado de Maestro/a en Edu-cación Infantil. Didáctica de las Ciencias Experimentales y Sociales, 30, 171-188 (2016).
12. Eugenio, M., Aragón, L.: Experiencias educativas en relación a la Agroecología en la Educación Superior española contemporánea: presentación de la Red Universidades Culti-vadas (RUC). Agroecología 11, 31-39 (2017).
13. Eugenio, M., Zuazagoitia, D., Ruiz-González, A.: Huertos EcoDidácticos y Educación para la Sostenibilidad. Experiencias educativas para el desarrollo de competencias del pro-fesorado en formación inicial. Revista Eureka, 15(1), 1501 (2018).
14. Valencia Sáiz, A.: Ciudadanía ecológica y Educación cívica, I JORNADAS SOBRE EDUCACIÓN CÍVICA Y DEMOCRACIA. EDUCACIÓN PARA LA TOLERANCIA. Fundación Jiménez Abad y Cortes de Aragón, Zaragoza (2006).
15. Beck, U., Giddens, A., Lash, S.: Modernización reflexiva. Política, tradición y estética en el orden social moderno. Alianza Universidad, Madrid (1997).
16. Gómez Benito, C., Lozano Cabedo, C.: ¿Consumidores o ciudadanos? Reflexiones sobre el concepto de ciudadanía alimentaria. Panorama social, 19, 77-90.
17. Valencia Sáiz, A.: Ciudadanía ecológica y Educación cívica, I JORNADAS SOBRE EDUCACIÓN CÍVICA Y DEMOCRACIA. EDUCACIÓN PARA LA TOLERANCIA. Fundación Jiménez Abad y Cortes de Aragón, Zaragoza (2006).
18. Dobson, A.: Ciudadania ecológica: ¿una influencia desestabilizadora?. Isegoría, 24, 167-187 (2005).
19. Valencia Sáiz, A.: Ciudadanía ecológica y Educación cívica, I JORNADAS SOBRE EDUCACIÓN CÍVICA Y DEMOCRACIA. EDUCACIÓN PARA LA TOLERANCIA. Fundación Jiménez Abad y Cortes de Aragón, Zaragoza (2006).

20. Valencia Sáiz, A.: Ciudadanía ecológica y Educación cívica, I JORNADAS SOBRE EDUCACIÓN CÍVICA Y DEMOCRACIA. EDUCACIÓN PARA LA TOLERANCIA. Fundación Jiménez Abad y Cortes de Aragón, Zaragoza (2006).
21. Rekondo, M., Espinet, M., Fitó, A.: Las asambleas de huerto como herramienta para trabajar la toma de decisiones en Educación para la Sostenibilidad. IN: APICE (Org.) XV ENCUENTRO DE DIDÁCTICA DE LAS CIENCIAS EXPERIMENTALES, pp. 733-739. Universidad de Santiago, Santiago de Compostela (2012).
22. Barrón, A., Muñoz Rodríguez, J.M.: Los huertos escolares comunitarios: fraguando espa-cios socioeducativos en y para la sostenibilidad. Foro de Educación, 13(19), 213-239 (2015).
23. Fernández Morilla, M., Fuertes, M.T., Albareda, S.: Sostenibilización curricular en la edu-cación superior: propuesta metodológica. Opción, Año 31, Nº especial 6, 284-304 (2015).
24. Rodríguez-Marín, F., Fernández-Arroyo, J., García, J.E.: El huerto escolar ecológico como herramienta para la educación en y para el decrecimiento. Investigación en la escue-la, 86, 35-48 (2015).
25. Gómez Benito, C., Lozano Cabedo, C.: ¿Consumidores o ciudadanos? Reflexiones sobre el concepto de ciudadanía alimentaria. Panorama social, 19, 77-90.

Energy Efficiency and temperature reduction through green walls in heat islands - methodological framework - Valle de Aburra urban area case.

Quijano R, [1] Dominguez J,[2] Quijano JP [3]

[1]Nacional University of Colombia. Minas Faculty. School of Processes and Energy. Carrera 80 #65-223, Medellín Colombia. rquijano@unal.edu.co
[2]Cience and Innovation Ministry. CIEMAT. Energy Department. Renovable Energies Division. Av. Complutense, 22. 28040, Madrid (España). javier.dominguez@ciemat.es
[3]The University of Newcastle, University Drive,Callaghan, NSW 2308, Australia. Juan.quijanobaron@uon.edu.au

Abstract. Some research has been done on urban heat islands in Colombia, but there are still not enough relevant studies in the metropolitan area of the Aburrá Valley. Medellin center district is the area with the highest surface temperature of the Aburrá Valley, where the heat islands effect is present due the large amount of motorized vehicles. There are approximately 1'055,000 vehicles, of which 49% are motorcycles, 42 % automobiles, 7% taxis and trucks, 2% buses, and less than 1% Metroplús system vehicles (bus rapid transit system). These sources generate greenhouse gas emissions of 2'606,333 Ton / year of CO_2, 10,176 Ton / year of CH_4 and 63 Ton / year of N_2O represented in an energy consumption of 37,784 Tera Joule / year in mobile sources and 58,480 Tera Joule / year in stationary sources. Due the solar radiation and lack of natural vegetation, the temperature could reach 31.3 °C. In this paper, green walls are simulated using the ENVIMET tool to forecast microclimate changes in urban areas. The food market was selected as a study case, where simulations found a decrease of 3.1 °C in ambient temperature, CO_2 absorption of 37.5 kg / day, CO_2 emission decline of 899.4 Ton / year, and electricity savings of 2,248.45 Mwh / year. Moreover, this scenario represents €324,100 savings per year for the food market and it can be replicated to other locations in Medellin, Colombia or cities around the world.

This simulation proposes a methodological framework to improve quality of life for people who are living in high-polluted urban areas and want to reduce energy consumption and CO_2 emissions. The aim is to seek the sustainability of the city and minimize the risk of heat islands associated diseases such as stress, fatigue and respiratory illnesses.

Keywords: Energy Efficiency, CO_2 Emissions Reduction, Heat Islands, Green Walls

1 Introduction

Medellín, capital of the department of Antioquia, is the most populated city of the departament and the second of Colombia. The city is located in the Aburrá Valley, in the Andes mountain range, constituting the largest urban center of the Andean western branch. It is located at coordinates 6°13'55"N - 75°34'05"W and has a total area of 328 km² of which 110 km² are urban and 218 km² are rural [1]. The elevation of Medellin varies between 1,800 and 1,500 meters above sea level with the Nutibara and El Volador hills located in the middle of the city.

The city has a daily temperature that oscillates between 12 °C and 30 °C, being these constants during the year, and an average annual rainfall of 1,656 mm. The winds are smooth and constant, blowing mainly in a north-south direction [1].

The Aburrá valley has an area of 1,152 km², an approximate length of 60 kilometers and a variable amplitude. In the middle of the valley, the width is around 10 kilometers and it is where Medellín is located [1]. The valley is part of the Medellín river basin, principal fluvial artery and is characterized by an irregular and steep topography.

2 Metodology

According to the World Health Organization - WHO - [2], the ideal value for any city is to have 7 trees / person, but in Medellin the studies reveal that there are only 3 trees / person. Likewise, WHO recommends green space of 9 m^2 / inhabitant, while the city has 5.2 m^2 / inhabitant.

Medellin city center has been selected as the study case, since it is among the highest surface temperature areas in the Aburrá Valley. Furthermore, it is where the heat island effect is more notorious according to the study carried out by Martínez in 2017 [3]. The city center is also a place with a high number of related problems, such as low vegetation density, streets build in concrete and asphalt (materials that absorb heat), and roads with high vehicular flow. The high population density also exacerbates the problem of heat islands: approximately 300 houses per hectare by 2010 and this figure is expected to increase [4].

The simulation is based on the corrective alternatives evaluation. This consisted in intervening the existing structure using the ENVIMET software, which allows the modification of the landscape and the use of green walls [5]. In the same way, the methodology of the intergovernmental panel on climate change - IPCC [6] was applied for the greenhouse gas emissions calculation, the avoided carbon dioxide emissions calculation, the electric power savings calculation and analysis, and the economical assessment. This is how emphasis was placed on sustainable and easily applicable methodologies that can be replicated in other urban areas.

2.1 Heat Islands

The Urban Heat Island of - UHI is a term that refers to the characteristic heat of the atmosphere and surface in urban areas compared to its undeveloped environments [7]. The concept is applied to particular areas of the city that have considerable temperature differences with the rest of the city. They are mainly identified as having high temperature zones, mainly in densely urbanized areas, resembling the shape of an island. It can present variations with respect to its surroundings of 1 ° C at night and of 12 ° C in the day in times of summer and densely populated cities (more than a million inhabitants) [8], these changes vary in the different seasons [9].

Many differences are found in the diverse neighborhoods of the city, when analyzing Medellin seasonal climate information. The warmest neighborhoods are those located in the center of the city (La Candelaria, El Chagualo, San Benito, among others) and in the northern part of the Medellin river bank (La Toscana, Boyacá-Las Brisas, Moravia, Santa Cruz), while the coldest neighborhoods are located in the highlands
from the surrounding mountains (Altos del Poblado, San Lucas, La Sierra, eight from Marzo, Oriente, Santo Domingo Savio, San José de la Cima, Carpinelo, Picacho, among others).

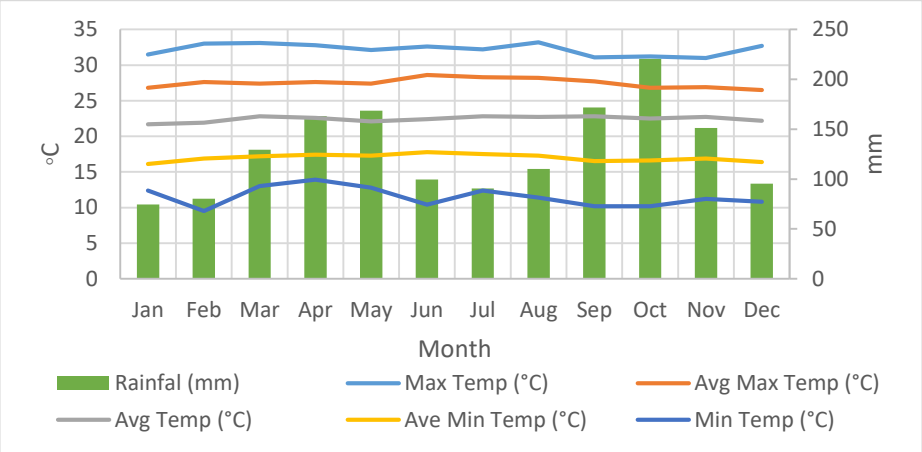


Figure 1. Medellin climatic varaibles. Source: Institute of hydrology meteorology and environmental studies.

On sunny days, noon temperatures can reach up to 30 ° C. However, in Medellín, clear days are rare, a normal day in Medellín is partially cloudy with intervals of sun and shade, which means that the insolation rate in Medellín is relatively low; an average of 5 or 6 hours of sunlight a day, compared to coastal cities with an average of 7 and 8 hours of sun a day. On a partly cloudy day, temperaturas could rise to 27 ° C at noon and in the rainy it barely reaches 24 ° C (see Figure 1).

On the other hand, the main heat island effect is the increase in temperature and thermal sensation in specific areas, this is accompanied by humidity reduction, which makes it less likely to rain. The thermal shocks in the summer and the decrease in air circulation increase particulate matter concentration (PM_{10} and $PM_{2.5}$) affecting the people's health, especially vulnerable population such as children, elders and people with respiratory pathologies [10]. There is also a greater expenditure of water, both for human consumption and for irrigation and refrigeration activities, thus generating greater energy consumption to alleviate the microclimate that exists. This aggravates the problem, because when using cooling systems, the emission of residual heat and the emission of greenhouse gases increases e.g. CO_2.

2.2 CO_2 Emissions

CO_2 emissions produced in fuel consumption

The greenhouse gas emissions for 2014 were 2'606,333 Ton / year of CO_2, 10,176 Ton / year of CH_4 and 63 Ton / year of N_2O. Cars and trucks produced most of these greenhouse gases and main fuel carbon dioxide emitters were gasoline and diesel. Gasoline and vehicular gas were responsible for most methane emissions, while more than 60% of nitrous oxide was responsibility of gasoline [11].

For the same year, total pollutants emissions from stationary and mobile sources were 154,447 Ton / year of carbon monoxide CO, 16,306 Ton / year of nitrous oxides - NO_x, 3264 Ton / year of sulphurous oxides SO_x, 15,214 Ton / year of volatile organic compounds - VOC and 1465 Ton / year of particulate material less than 2.5 microns $PM_{2.5}$. In terms of stationary sources, industries emitted 3,330 tons of CO, 2,844 tons of NO_x, 2,981 tons of SO_x, 1,236 tons of VOC, 1,719 tons of particulate material - PM, 689 tons of particulate material less than 10 microns PM_{10} and 306 tons of particulate material less than 2.5 microns $PM_{2.5}$ [11].

It is important to highlight that due the high levels of air pollution, the Secretary of the Environment declared state of prevention for forty days, including three days of red alert [12]. Besides, a group legal action achieved one of the greatest advances to improve air quality in the Aburrá Valley: the Administrative Court of Antioquia ordered the Metropolitan Area (AMVA) and the Medellin's Mayor to adopt precautionary measures to avoid, at any time of the year, exceeding the moderate pollution level (yellow level) [12].

CO_2 uptake

To analyze the CO_2 uptake of the selected species for the green wall, it was taken into account that the species Amaranthaceae and Duranta Erecta "Gold edge" have a C4 photosynthesis path. It means that they are more efficient capturing CO_2 and perform better in hot and dry climates. Additionally, it was considered that these plants absorb between 2 and 5 grams of carbon dioxide [13] and an average value of 5 was established to calculate the absorption of the entire system; As the green wall consists of 7500 plants, it is estimated that the absorption is 37.50 Kg per day.

Avoided emissions of CO_2

For the calculation of avoided emissions, we started from the factors used in the EXTERNEE project [14] for a combined cycle power plant. This is based at the Termo Sierra power station, located in the middle Magdalena Antioqueño, with a value of 400 gr / kWh of CO_2. Considering the saving of 2,248.4 kWh / year that indirectly represents the energy that is potentially used in fans in the food market, a saving of 899.4 tons of CO_2 / year is generated.

2.3 Green Walls

Green walls or living walls are systems in which the structure incorporates a medium for plants to grow. This concept is relatively new and is used mainly for facades, but also for interior walls. They consist of pre-cultivated panels or geotextile felts that support the vegetation and can adapt to grow vertically as coverings, ferns, small shrubs, flower perennials and others [15]. Nowadays there is a great variety of green walls, among them; vegetal facades that are extensive systems and their structure can be designed in cables, meshes, curtain wall, vegetal sliding facade, among others. In other category are the living walls that are intensive and can be classified into hydroponic, modular, among others and these in turn are divided into the plant support materials, which characterizes them [15].

There is a great variety of systems to adapt vegetation to the walls of the buildings, but each place has specific needs according to its environment and its objectives, therefore, three alternatives are presented to face the aforementioned problems. Two of these options are systems of intensive living walls, the first is in geotextile filter and the second is in foams. The third is a plant facade that has an extensive double skin system with a mesh structure.

All systems have different advantages and disadvantages. The two hydroponic systems, ie the geotextile felts and the foams, share benefits such as low weight, their innovative system that allows the growth of the roots in surfaces and their cultivation in diverse substrates; One of the most important benefits is that if a plant dries or for some reason is missing, it can be replaced without needing to wait for them to grow again, and they have a strong thermal insulation effect. The main disadvantages are the high initial investment involved, the complexity of the installation and the high maintenance required. Facade systems have different advantages than previous systems, such as the low cost of installation, transport and maintenance, they also reduce the temperature through evapotranspiration and capture of atmospheric pollutants.

Green walls were designed in facades and paved landing areas of the food market to reduce the effects of heat-absorbing surfaces. These areas represent more than 31% of the total area of food market and are continuously exposed to the sun, with a high thermal absorption due its albedo close to 0.03 [16]. The projected living wall system is based on geotextile felts, it is placed on a frame, adjacent to the walls of the food market and located in an eastern and western direction. Live walls are estimated to be 175 linear meters of coverage, with heights between 2.5 and 3.55 meters, for a green wall

area of 1,050 m^2. In addition, urban interventions were proposed in the area to increase plant cover and thus reduce the proportion of bare soil and asphalt or concrete surfaces (10,600 m^2 of intervened area around the retail plaza).

The food market is located on the south bank of the Medellin River (coordinates 6º15'26.229"N - 75º34'21.6618"W) and occupies an area of 33,438.6 m^2, of which 10,652.6 m^2 are paved, as shown in Figure 2 [17].



Figure 2. Food Market. Recovered from Mapgis

For the selection of plant species it is important to consider the orientation of the walls respect to the sunrise and sunset and determine their insolation. The most suitable walls for the intervention are in front of the "ferrocaril avenue" and the highway. These sites have southeast and northwest orientation respectively and their insolation is six (6) hours for each one.

Subsequently, a matrix for the selection of species proposed by Bolaños and Moscoso [18] was used. It characterizes the species according to criteria (temperature resistivity, sunlight exposure needed, irrigation required and adaptability) and giving them a score of 0 to 3; being 0 not suitable and 3 the most suitable. After assess the criteria, the species with the highest scores are selected for the green wall. The species used for the analysis are:

Sp 1: Clorophytum comosum (cinta)
Sp 2: Hedera helix (English ivy)
Sp 3: Duranta Erecta (Gold edge)

Sp 4: Geranium 'Johnson's Blue' (Geranium)
Sp 5: Celosia (Amaranthaceae)

Once the matrix was assessed, it was concluded that the most suitable plants for the green walls are Duranta Erecta "Gold edge" and Celosia (Amaranthaceae). The first, is native of America and belongs to the verbenaceae family, which grows rapidly and needs direct solar radiation, which is ideal for the selected location of the green walls. The second, is a tropical plant native of Asia, Africa and America, part of Amaranthaceae family, characterized for a fast growing, yellow, orange, red and pink flowers, and like the Duranta Erecta it prefers the direct sun radiation.

2.4 Energy efficiency

To carry out the calculation of the energy efficiency, we start with the number of stores in the food market: 3,080 [19]. Additionally, the stock of household appliances and the consumption in each commercial place were identified. It was found that retailers were using fans with an average power of 400 watts and an average use of 5 hours a day. These variables generate a total gross saving of 2248, 4 MWh / year when the fans are no longer used and this value does not include lighting or refrigeration systems for the food.

3 RESULTS

Credits are given to the Engineering Projects Seminar I working group, “Menos Centígrados”, who applied this simulation under the supervision of the tutor Alejandra Herrera and professor Ricardo Quijano. In order to observe the way in which the implementation of the green wall affects temperature, the free version of the ENVIMET program was used. It allows to simulate the temperature dynamics over time based on environmental parameters. Three different types of materials that are used in the facades are considered:

- Metal sheets
- Bricks
- Concrete

A fourth material that simulates the characteristics of the green wall was added. It should be noted that the program does not allow to simulate directly the plants, therefore, the simulation is an approximation of the behavior of the temperature around the zone of intervention. In order to obtain comparative data, two simulations were carried out: one with the current walls of the structure and the other with a material that represents the vertical plant system. The two simulations were recreated for the conditions of early 2017 between 9:00 a.m. to 1:00 p.m. Each simulated hour is equivalent to four real hours, so each simulation took 16 hours in real time. In Figure 3 it can be seen the food market floor plan used in the simulation.

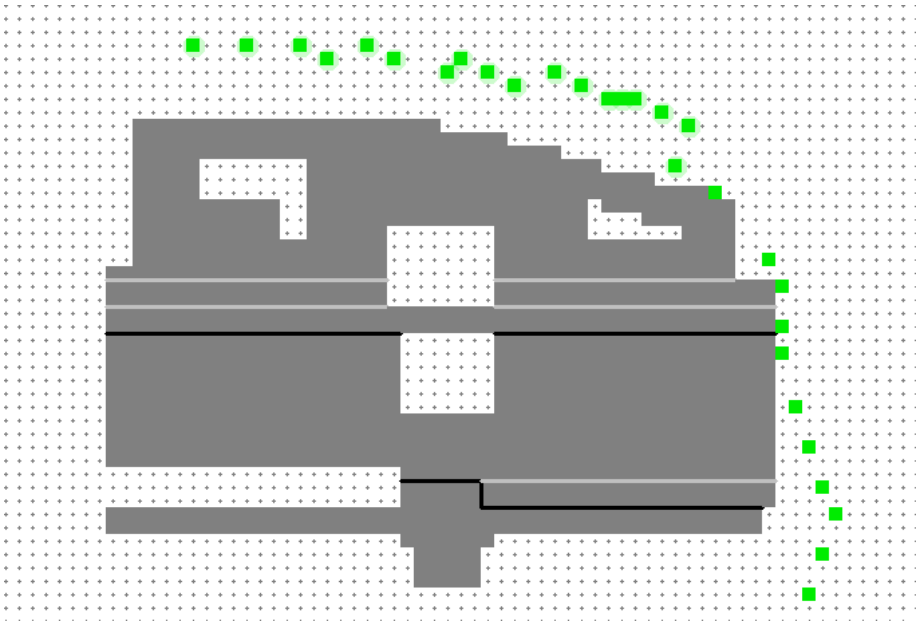


Figure 3. Visualization of the structure of the food market.

The following figures show the behavior of air temperature at 12:00 pm at 3.1 meters above the ground.

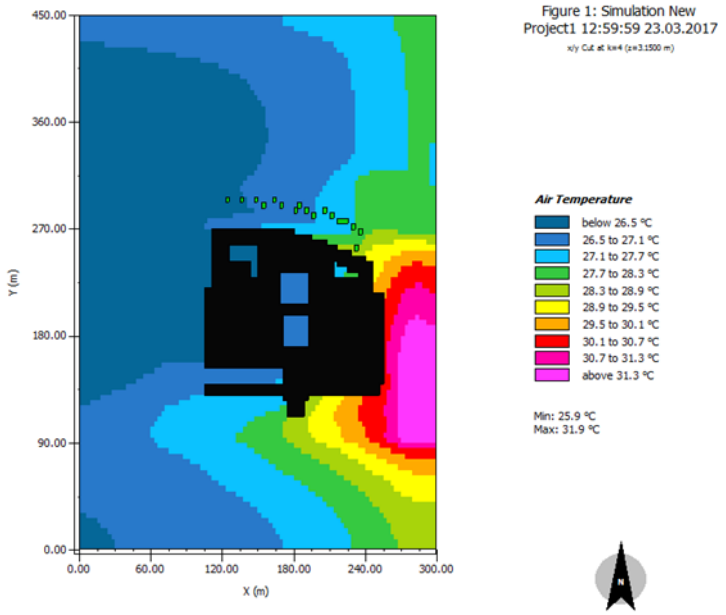


Figure 4. Air temperature simulation without the green wall

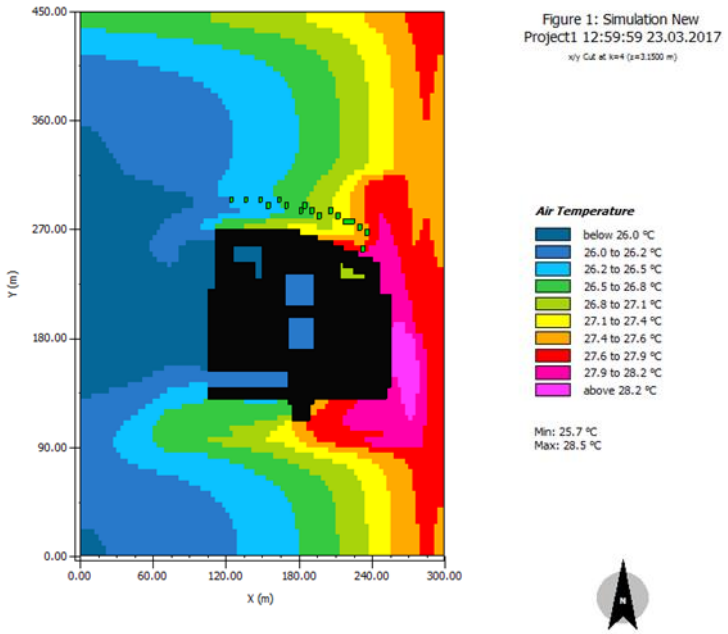


Figure 5. Air temperature simulation with the green wall

The simulation with the green wall shows the maximum temperature of 28.2 °C, while the simulation that does not include it, the maximum temperature is 31.3 °C. As a result, the green wall can generate a temperature reduction of up to 3.1 °C. Likewise, it can be appreciated that the temperature decrease in the surroundings of the square is of about 1°C and in the closest area of the wall the temperature distribution is less uniform, given the cooling effect that it produces.

Similarly, these interventions result in a well-being for the quality of life of people, minimizing the risk of illnesses associated with heat islands, such as stress, fatigue and respiratory diseases, giving way to a comfort zone. It should be noted that these plant layers can harbor animal life, so that a habitat for the lesser fauna and flora would also be created.

From the financial point of view, it is projected to be a brand that is increasingly recognized in the green building sector. The project in its first year of operation the company presents a cash flow and positive profits, in addition its Internal Rate of Return to 3 and 5 years is more profitable than most companies in the sector. Finally, its Net Present Value for rates between 20% and 40% is positive, showing that it will be a profitable project.

4 METHODOLOGICAL FRAMEWORK

The objective of the work is to exhibit a methodological procedure that can be applied in other sectors of the city of Medellin or in other urban areas. In this way, a conceptual map has been drawn up (see figure 5) to guide the in the achievement of objectives. The model is called the Energy Efficiency Model and green walls - EFERVERDE.

This proposal is presented as the interaction between the different results of each of the models, when the secondary information of the cities is incipient and it is necessary to create or work with primary information. The philosophy of the EFERVERDE model is contained within the context of Platform [20]. It is one of the few versions that comprehensively relates consumption and energy savings, the existing type of construction of green walls/roofs, the emission, capture and avoided emissions of CO_2 [6], and geographic information systems SIG [21].

Likewise, this methodology allows us to simulate not only the radiation generated by the heat islands, but also the radiation that can be reflected by the type of construction materials. Finally, it allow the proposal of scenarios for temperature reduction in urban areas.

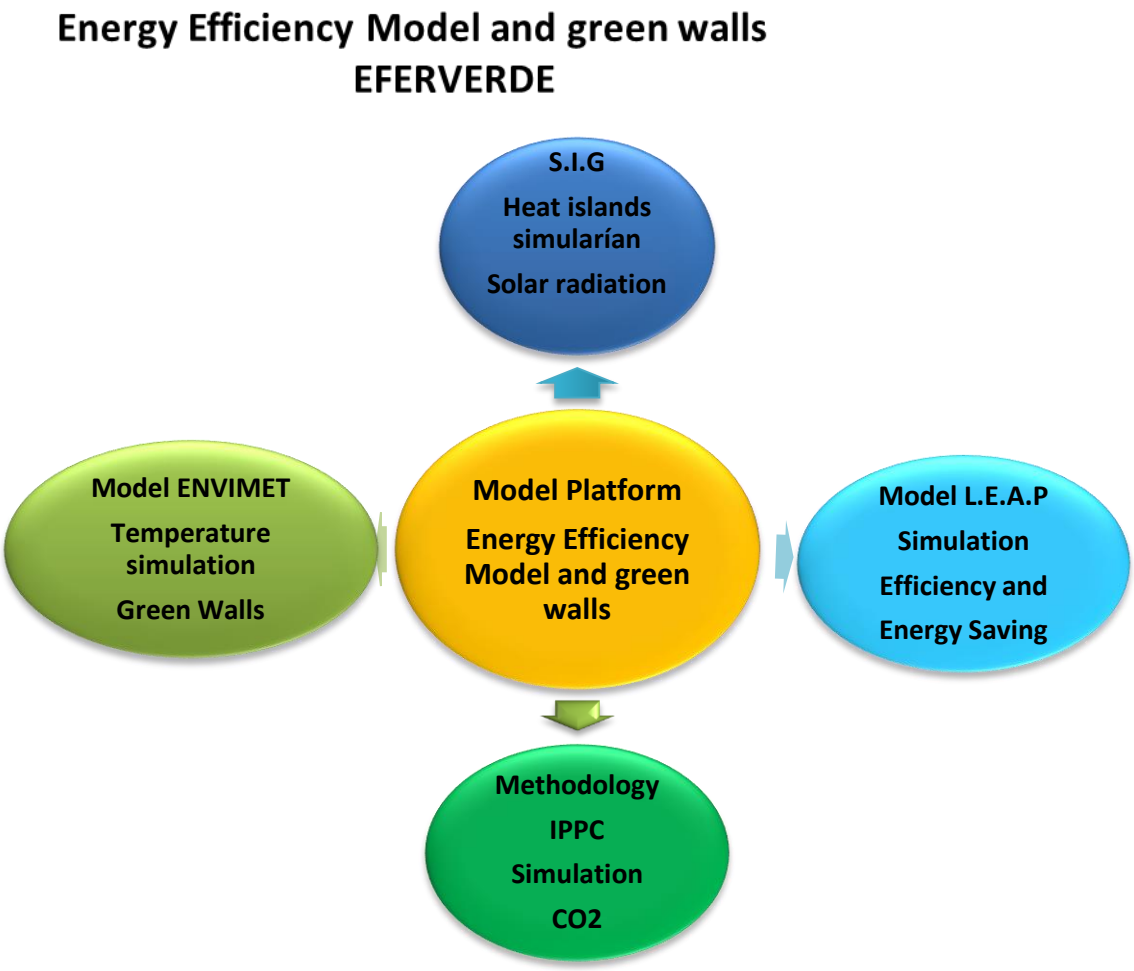


Figure 6. Diagram of the EFERVERDE Model. Source: self made

5 CONCLUSIONS

In the simulations, it is clear that heat islands effects are mitigated with the inclusion of green walls. They can reduce ambient temperature by 3.1 °C and the 7,500 plants that make up the green wall absorb 37.5 kg of CO2 per day. This is achieved by using green walls on two sides of the food market, which leaves the possibility of further energy efficiency improvement if green walls are implemented on all sides or in the roof.

In energy efficiency, 2,248.45 Mwh / year are saved in electricity, which represents around € 324,100 per year in savings for food market, taking into account the current rates of Medellin's electricity providing company.

With energy savings, the concept of avoided emissions is applied given that 899.4 Ton CO2 / year are no longer emitted. This may be an opportunity to negotiate CO_2 in international markets or receive aid from global organizations.

One of the most notorious elements is the concept of quality of life. Green walls improve aesthetics and perception in a densely populated, polluted and congested area. It can also minimize the risk of illnesses associated with heat islands, such as stress, fatigue and broncho-respiratory diseases. It should be noted that these plant layers can harbor small forms of animal life, so that a microhabitat for fauna and flora would also be created.

6 ACKNOWLEDGMENTS.

We are grateful with the of the Seminar Engineering I students, group two, in the Faculty of Mines of the of the National University of Colombia, Medellin campus, for their work "Less Celsius An alternative heat island mitigation in Medellín - Colombia": Jhojan Felipe Beltrán López, Valentina Betancur Jaramillo, María Isabel Correa Agudelo, Juan Manuel Gómez Díaz, Camilo Andrés Pedroza Barbosa, Julián Pérez Gómez, Hernán Stiven Posada Angel and the tutor Alejandra Herrera for their contribution in the preliminary simulation of the green wall.

It highlights the collaboration and contributions of CIEMAT and the University of Newcastle were decisive in the development of this research

References

[1] Alcaldía de Medellín [online] Recuperado https://www.medellin.gov.co/irj/portal/medellin
[2] Organización Mundial de la Salud [online] Recuperado http://www.who.int/gho/es/
[3] Martínez, A. (2017). Islas de calor en el área urbana del valle de Aburrá. Tesis de maestría. Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín. Recuperado de http://bdigital.unal.edu.co/57837/1/1039453046.2017.pdf
[4] López, F., Nieto, D., & Arias, C. (2010). Relaciones entre el concepto de movilidad y la ocupación territorial de Medellín. Revista EIA, (13), 23–37.
[5] ENVI_MET is a software company with a service portfolio including cities & health, trees & vegetation, building & climate and wind & sun. [online] Recuperado https://www.envi-met.com/
[6] Panel Intergubernamental de Cambio CLimatico [online] Recuperado www.ipcc.ch/home_languages_main_spanish.shtml
[7] Voogt, J. A. (2008). Islas de calor en zonas urbanas: ciudades más calientes. EEUU: American Institute of Biological Sciences.

[8] Trujillo Uribe, S. (2012). Estimación de temperatura superficial en el Valle de Aburrá mediante técnicas de percepción remota.
[9] Ángel, L., Ramírez, A., & Domínguez, E. (2010). Isla de calor y cambios espacio-temporales de la temperatura en la ciudad de Bogotá. Rev. Acad. Colomb. Cienc, 34(131), 173-183.
[10] Guindon, S. M., & Nirupama, N. (2015). Reducting risk from urban heat island effects in cities. Natural Hazards, 77(2), 823-831.
[11] Área Metropolitana del Valle de Aburrá - Universidad Pontificia Bolivariana. (2014). Actualización del inventario de emisiones atmosféricas del Valle de Aburrá.
[12] Secretaria de Movilidad [online] Recuperado http://www.elcolombiano.com/medio-ambiente/fin-de-la-prevencion-pero-con-el-aire-no-hay-que-bajar-la-guardia-FL8508351
[13] Mota, C., Alcaráz López, C., Iglesias, M., Carvajal, M., & Martínez Ballesta, M. C. (s.f.). Investigación sobre la absorción de CO_2 por los cultivos más representativos de la región de Murcia. Recuperado de http://www.lessco2.es/pdfs/noticias/ponencia_cisc_espanol.pdf
[14] ExternE-Methodology [online] Recuperado http://www.externe.info/externe_d7/
[15] Carrera Acosta, A. (2011). Sistemas vegetales verticales. Universidad Politécnica de Madrid. Recuperado de http://oa.upm.es/10204/2/TESIS_MASTER_ALVARO_CARRERA_ACOSTA.pdf
[16] Tojo, J. F. (2001). La ciudad y el medio natural (Vol. 3). Ediciones AKAL, pp 141.
[17] Alcaldía de Medellín, [online] Recuperado https://www.medellin.gov.co/MapGIS/web/swf/MAPGIS_FLEX.jsp
[18] Bolaños-Silva, T., & Moscoso-Hurtado, A. (2011). Consideraciones y selección de especies vegetales para su implementación en ecoenvolventes arquitectónicos: una herramienta metodológica. Revista Nodo, 5, 5–20. Recuperado de https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3736189
[19] Plazaminorista.com. Plaza Minorista de Medellín. [Online] Recuperado de http://www.plazaminorista.com/portal/sitio/index.php
[20] R Quijano, J, Domínguez, y S, Botero, (2012) MODERGIS Application: Integrated simulation platform to promote and develop renewable sustainable energy plans, Colombian case study, Renewable and Sustainable Energy Reviews 16 (2012) 5176–5187, Vol 16, Issue 1, ISSN – 1364-0321
[21] J. Domínguez y J. Amador, «Geographicalinformationsystemsapplied in thefield of renewable energy sources», Computers& Industrial Engineering, vol. 52, no. 3, págs. 322–326, 2007.

A Proposal to Organize the Collaborative Design of Sustainable and Inclusive Smart Cities

Jorge J. Gómez-Sanz[1] and Rubén Fuentes-Fernández[1]

Universidad Complutense de Madrid,
{jjgomez, rfuentes}@ucm.es
http://grasia.fdi.ucm.es
28040 Madrid, Spain

Abstract. While governments across the world are increasingly and eagerly adopting research in smart cities, experts are still dealing with issues related to their design. Before incorporating any number of disruptive technologies, there is a need to understand what the goals and effects are. Citizens, and all the other stakeholders, need to reflect on the kind of cities they really want, and what changes these systems bring to them. Making citizens central to any plan of change is mandatory to get inclusive and accepted smart cities. Though inclusiveness is a necessary and desired requirement, changes must be also sustainable. Cities need resources (e.g. utilities, food and infrastructures), and their fast growing pace is increasing these needs. Decisions need to accommodate these demands and existing means, going beyond merely economical criteria. Currently, there is a lack of tools to properly deal with all these challenges. Traditional techniques usually involve large field studies (e.g. interviews, questionnaires, and qualitative/quantitative analysis). These cannot be repeated frequently to get citizen feedback on decisions or proactive input. Online methods can help to address the effective interaction with large groups of citizens in this context. The paper introduces a project started in Spain with the goal of developing theories and tools for this online approach. It relies on realistic simulations as the basic communication unit. The content is work in progress. It refers to requirements of the necessary tools for this massive citizen participation, and the envisioned working method that could be applied.

1 Introduction

The definition of what a smart city is remains an open issue. According to [1], it involves thinking about inner and outer factors, and their interactions. Outer factors include people communities, economy, governance, natural environment, and built infrastructure. Inner factors consider the elements directly supporting the smart city, including technologies, organization, policies, and their requirements. In this context, technology and its related solutions play a key role to support the rest of the smart city elements.

There is discussion about whether the goal should be the smart or the sustainable city [2]. In smart cities, the focus is mainly on Information and Communication Technologies (ICTs) to provide services, while sustainable cities consider

a wider indicator scope focused on the environment. This paper considers that the goal is on improving the situation of the environment and citizens through integrated ICT solutions, and thus focuses on *smart sustainable cities* [3].

Despite this focus, the technological systems that are expected to assist people in smart cities are being developed without them to a large extent. The "Inclusive Smart Cities: a European Manifesto on Citizen Engagement" [4], promoted by the European Commission, considers that an essential part of smart cities initiatives ought to focus on the citizens' needs. These initiatives have to create designs for citizens and aimed at increasing the quality of their daily living. Cities have to be livable ones, and not only for a few. However, such designs implies a level of involvement of many different stakeholders and over time that is showing elusive [5].

Inclusiveness is a particularly challenging issue. The design of cities adopts certain perspectives, and leaves those of other groups (e.g. women, children, elderly, disabled or ethnic minorities) frequently out of scope [6]. However, their understanding ot the quality of solutions can be very different from those considered. A well-studied example is that of people with disabilities (e.g. [7,8]). There are no major integrated plans that deal with the augmentation of our cities with technology to improve the quality and well-being of all the citizens, specially those under-represented groups. Even more, some people may decline to use technologies, e.g. older people, what makes them a collective in risk of exclusion from any effort of engaging citizens. Having the right representation of each collective is crucial for any consultation [9].

The way to achieve these goals, making our lives better in cities by means of ICT solutions in a sustainable and inclusive way, is the focus of this paper. We strive to achieve the definition of *sustainable inclusive smart cities*.

There are works about the development of smart cities [10] and their impact [11]. However, we still lack methodologies that allow to capture all the involved aspects, as well as evaluating the impact of the solutions by the different actors, specially those with some disability or functional diversity. Therefore, inclusiveness is not guaranteed. It is strongly advised to involve all social actors (citizens, developers, policy makers, public servants, industry, to cite some) so that they engage and contribute to the smart city definition process, but it is unclear how to enact such participation to the extent needed.

Current processes are focused on the management of semi-presential meetings [5,12] or the analysis of generic aspects of the solution [13] by means of metrics and indicators for smart cities. Tools are limited to free form information sharing [14], or in a more structured and professional way, perhaps focused on some participant professional, e.g. an architect. This can make difficult to understand all the features and implications of solutions.

The use of online tools is not new [15], but again they are hard to use as an effective communication tool. 3D simulations (including inversion ones and virtual reality) are better understood by non-professionals for some problems [16,17,18]. However, even in these cases, these simulations have drawbacks as

effective communications tools, i.e. to communicate the impact of the decisions and to analyze the problem.

Given this situation, the project's proposal is based upon three pillars:

- The creation of mechanisms for massive citizen engagement towards the definition and enactment of inclusive smart cities. Citizens would help to identify what improvements in their lives should be pursued and which ones have a greater impact.
- These mechanisms should support a low-cost tracking and evaluation of changes. This should facilitate the evaluation of alternatives and the assessment of the impact of changes during the execution of solutions, frequently spanning over long periods.
- The detailed analysis of the potential consequences of the modification of people' behaviors and resources with the planned solutions. The effect on their lives and environment should be anticipated as much as possible. This would allow to quickly discard solutions unsuitable for citizens, specially for people with special needs, or that may not be sustainable.

These pillars require processes and tools that enable the massive collaboration of stakeholders while the smart city project is discussed and afterwards when it is being executed. These mechanisms have to combine effectively the discussion around problems, solutions, desirable qualities, and expected results. It also need tools for the realistic simulation of the daily living of people with different life situations and locations, e.g. within houses or large installations.

The proposal has several precedents in different domains. These support both the need and feasibility of the approach.

Regarding the collaborative process, the H2020 European project *Fostering a Transition towards Responsible Research and Innovation Systems* (FoTRRIS) is a precedent. It addressed the problem of collaboration in *Responsible Research and Innovation* (RRI) by developing the concept of collaborative RRI (co-RRI). It created a web platform to support *competence cells*, which were small organizational unit that group together several knowledge actors from science, policy, industry and civil society to "co-design,-perform, and -monitor co-RRI projects that are attuned to local manifestations of global sustainability challenges" [19].

Following the idea on 3D simulations, a similar tool was presented in [20]. It provides an implementation of a massive online focus groups to discuss assisting solutions, which are presented as 3D simulations.

This proposal builds over these works, but considering a larger scope for both the simulations and the discussion groups. This is required by the particular needs of smart city design. The paper discusses about these massive participation tools and what kind of working method would be adequate to attain these goals. It is work in progress, though based on available results cited along this paper.

The rest of the document is organized as follows. Section 2 introduces some related works in the definition of smart cities and the use of simulations for their design. Section 3 presents the ideas underneath the proposal, and Sect. 4 the proposed process to address the design of sustainable inclusive smart city. The paper concludes with the discussion in Sect. 5.

2 State of the art

Traditionally, the gathering of opinions and feedback happens only at the beginning of the project and at the end. Approaches with users in the loop (e.g. agile and lean), are difficult to use in smart cities given the number and variety of participant profiles. This causes a disconnection with the real needs of the citizens. In the case of people with functional diversity or any disability, it is frequent they feel that deployed systems around them do not adapt to their daily living activities or invade their privacy. As cities develop and the differences between regional urban systems grow since the 90's, the degree of social inequality, cultural conflicts and political fragmentation in the cities increase as well [21].

The "living labs" [22] are means to arrange this collaboration in a context that facilitates a more active participation between the different actors in a system. They allow collaboration since the product inception until its deployment. Among its cons are the cost of this experimentation and the difficulties to make experiments during long periods or that involve dangerous situations. In the case of smart cities, the scale is an issue as well: how to experiment with environments, systems and people at the city scale, when the lab necessarily implies a limited deployment of the systems, the participation of a reduced group of people, and limited monitoring.

An alternative to living labs are simulations, which could be applied as well to the design and development of sustainable inclusive smart cities. These have proven to be useful as early experimentation of solutions related with Ambient Intelligence (AmI) in smart building scenarios [23]. Also as a tool to enable collaboration in multidisciplinary problems [24]. In the context of cities, there are works (e.g [17]) that explore the use of 3D geo-visualization to foster participation concerning local urban plans.

This proposal intends to go one step beyond into two aspects: the nature of the simulations (using crowd simulations that include the city inhabitants, not only the buildings), and the scale (to capture and transfer the feedback of the citizens into the simulation and track it along the development).

The simulations allow to communicate better what is going to be built and understand the nature of situations that are complex because of the combination of involved actors [25]. The collaboration in their construction also becomes a key element to ensure the project success. However, building collaborative simulations in the context of smart cities brings new challenges. Among them, how to achieve a realistic simulation of the smart city, integrate simulations in the development process, and support and get a massive citizen involvement.

The simulations have to be realistic to validate decision and avoid erroneous assumptions about the effect of decisions. For instance, if there are only acoustic alarms to signal a danger, this decision may segregate people with hearing issues or disabilities. The problem is highly related with bias in the algorithms, for which the standard IEEE P7003 [26] is being developed.

Smart city simulations also have to consider the temporal dimension, the physical space, and a realistic size and composition of the population. Engineers ought to be able to run the same scenario with different configurations of the de-

signed solutions (be it architectonic modifications or new technological systems) to evaluate their effect.

Now, there is no single simulation solution, and engineers have to handle different ones to address each meaningful aspect. There are traffic simulation [27] or those devised for immersion through virtual reality [28]. To handle and integrate simulations, Domain Specific Languages (DSL) an Model-Driven Engineering (MDE) [29] can be powerful tools to integrate feedback from contributors. DSLs allows to create custom representations of the problem adjusted to the training background of the contributor. MDE permits to create simulations and applications in a semi-automated way using the specifications of the DSLs.

As it can be seen, simulations are central to this proposal. They work as pieces of information that are processed by the participants. The way this information flows among stakeholders needs to be modeled as a co-creation workflow. This kind of processes have been studied specially with small groups, like [10], but taking this method to the massive scale required by the design of a smart city requires new mechanisms [30].

3 Proposals for a new smart city evaluation method

The basic principle of this work is to promote the citizen engagement into debates about how to improve the situation of the inhabitants of the city. This must have a special focus on the most vulnerable collectives (e.g. people with disabilities and elderly), who are frequently forgotten in their design. A known example is how the urban structure has to allow wheelchairs to access each location, or how semaphores should have acoustic signals for those with vision impairment.

The project will carry out experiments to inform the mechanisms and methods to work with real citizens. These will determine the requirements to create new simulations and improve the tools that identify risk situations, such as the above mentioned wheelchair issue.

Each experiment will start with citizens pointing out some aspects and elements of interest of their daily living. They will also describe their expectations about solutions for them. These elements will be described using simulations where inhabitants will be different pre-programmed collectives. This population will try to use the smart city solutions, which will be partially described using the citizens' expectations as requirements. The result will be recorded or live streamed, so that citizens can decide if what they see is what they expected. The availability of 3D streams or videos will allow to quickly disseminate results to enable citizens to provide again feedback on solutions. This would allow an iterative approach where citizens can be effectively involved in the design cycles.

Fig. 1 shows an illustrative example of the kind of proposed simulations. Crowd simulations tools are central to the proposal. They reproduce activities of the daily living of large groups of people in large scenarios.

Following the inclusiveness manifesto [4], the design of these solutions ought to comply the following requirements: (1) to increase the involvement of collectives in risk of exclusions (e.g. those less likely to use new technologies); (2) to



Fig. 1. Crowd simulation tool

show through simulations the interplay of existing solutions to build the city as a system of systems; (3) to use already available infrastructures and open data; (4) to provide quantitative metrics that allow to evaluate the impact of a solution over the population and the rest of the society.

The use of simulations and online discussion methods allow to address all these aspects. Playing videos of the simulations may help to reach a higher number of people. These videos could be adapted to people with visual impairments too (e.g. using automated captioning). Also, the simulations can capture the effect of different alternatives and show it in a more visual way. The emerging behaviors occurring within the simulation can be quantified, and reuse public data to gain realism.

The participation of citizens, and stakeholders in general, is conducted through Social Sciences methods. The proposal here is to extend the focus group technique [31], but conducted through Internet. To enable massive participation with low costs, such interaction needs to be made online, mainly processed with automated tools, and translated into some formal representation, as normative systems [20]. The online characterization is crucial, since face-to-face meetings are much more expensive to conduct, specially at this scale.

This feedback gathering method could be complemented with other Social Science methods, such as the DELPHI consensus agreement method [32]. This was used in the project DEMOS (IST-1999-20530) for conducting discussions in an Italian small town. DELPHI has been partially computerized in the literature [33,34], but its massive application to large groups is still an open issue.

The information input from experts would adhere to tailored formats. There would be DSLs targeted to their specific knowledge areas. Experts would find in those DSLs primitives to express the concepts they tend to use within their discipline. This way, we expect to express concepts such as sustainability or

inclusiveness according to each expert's point of view. The method is similar to the one proposed in IEEE P7003, but with more specialized tools.

Involving big groups of citizens while they interact with the system implies as well solving non-trivial technological challenges. Some of them are how to conduct the citizen participation in each selected communication channel, how to process this massive amount of information, and how to track the realization of this feedback along the development.

The tools should assist in the identification of inclusiveness or sustainability problems. For instance, in the hearing problem scenario with acoustic alarms presented in section 2, it is expected to run a number of simulations. Some of them should include people with hearing problems, so their specific issues to conduct the activities within the simulation can be detected. As a solution, engineers would devise different alarm signs, e.g. based on light signals. They could also find out other problems, such as how to deal with distractions by adding proximity sensors to the dangerous areas and mechanisms to infer distraction when people do not modify their speed or trajectory.

This research proposal can be summarized as discovering and designing what kind of inclusive smart cities societies and citizens want through massive feedback on interactive simulations. To do it, there is a need to strength online citizen participation, and to find ways to incorporate their online feedback as part of simulations of the environment and the solutions in place. This leads to two research objectives:

- To foster and develop multidisciplinary massive co-creation methods. These should enable the definition of problems and solutions considering an heterogeneous set of perspectives elaborated by a massive number of stakeholders.
- To develop new concepts and theories to describe inclusiveness and sustainability in this kind of environment. It is necessary to work in the modeling of the different concepts and perspectives of the socio-technical systems that exist in the city, and capturing their behavior at different abstraction levels. The inhabitants of these systems, the people, need to be specially well described, including their functional diversity.

4 A Collaborative Lean Process

A key element in this approach is a co-creation platform for the analysis and design of solutions that promote inclusive sustainable smart cities. This platform does not exist yet, but it is possible to identify what kind of working method it should enable from literature and works in other domains.

The intended working method (see Fig. 2) follows a "Lean Design" [35] approach to create the simulations. This method is centered and oriented to the users, what connects it with the RRI principles and the inclusiveness manifesto [4] ideas. The key aspects are:

- There is a continuous interaction with the participants and test of the new features. The participants' feedback (mainly from users), allows to identify their needs. These are the basis to find out the desired features of the

product. In our case, it enables to integrate the intermediate results of the research with the social actors. In particular, to identify the real needs of the collaborative process and their participants, and to evaluate the quality of the results.
– As a result, this allows to identify risks and mistakes early in the development, fixing the research approach and the development, if necessary.

The process is expected to be an iterative one, and the participants in the co-creation to change along the process. It is important to have an active participation of representatives from all the stakeholder groups.

There is a core group that ensures the process progresses. This is a multidisciplinary one, made of social scientists, social workers, health experts, communication experts, authorities, and engineers. Health experts are expected to give insights on well-being. Social workers and scientists attain the inclusiveness part, making sure the required collectives are represented and their needs met. Authorities, architects and engineers collaborate to develop the sustainability part of the city.

Initial simulations are created with this team of experts. They will point out at main areas to develop in the smart city project. The scope of the simulations will be extended starting with the small scale using the expertise of social scientists. They can conduct field experiments to collect precise and detailed information from manageable groups of people. This will inform the activities of the daily living to be considered initially. This input will provide the base to build more complex simulations.

The resulting simulations can be evaluated first in the computer with known existing metrics that determine the adequacy of the solution in terms of inclusiveness and sustainability [36]. For instance, if it is a system to facilitate the fluid transport of pedestrians within a facility, the evolution of the density of the pedestrians within the simulation can give clues on the success of the devised solution. A second qualitative evaluation can be made by citizens or experts. The processing of this information is a challenging one, but, if achieved, this knowledge can be captured and represented using Computer Science methods.

Then, the simulations can then be deployed to the larger public, and be subject of further modifications using the massive consultation methods in a collaborative platform. This would be built on past experience with the modeling of Parkinson and Alzheimer, where the goal was to model solutions that improve their well-being, while not risking their autonomy [37]. Here, the resulting models would show how simulated citizens carry out their daily activities.

Citizen feedback need to be properly formalized, so that future simulations take into account what citizens said. Therefore, if a simulation violates a large consensus reached in past simulations, the tools should raise an alarm. Nevertheless, efficiently processing this information and formalizing the result can be a tiring process. That is why DELPHI processes can be of use here, reducing the number of decisions stored. Anyway, these decisions should be inclusive ones. Hence, larger groups of people should not impose decisions over smaller groups. Avoiding this is a responsibility of the DELPHI moderators.

The duration of this process has to be determined before hand. Even though the process is online, not everyone will promptly answer. Continuous consultations may discourage citizenship to participate. Also, if citizens see that their feedback is not taken into account, they would leave too.

Additional input can be obtained through an active and continuous bibliography evaluation along the project. This is important since the debates on the smart city services may take months. Users produce in the meantime feedback in form of comments, and also subjective appreciations of the associated value of the solution. This problem is similar to that of the declining participation in political processes by the disappointed citizens [38]. Hence, reassurance that the feedback has value and that it is preserved along time is very important, specially if the project is a long one.

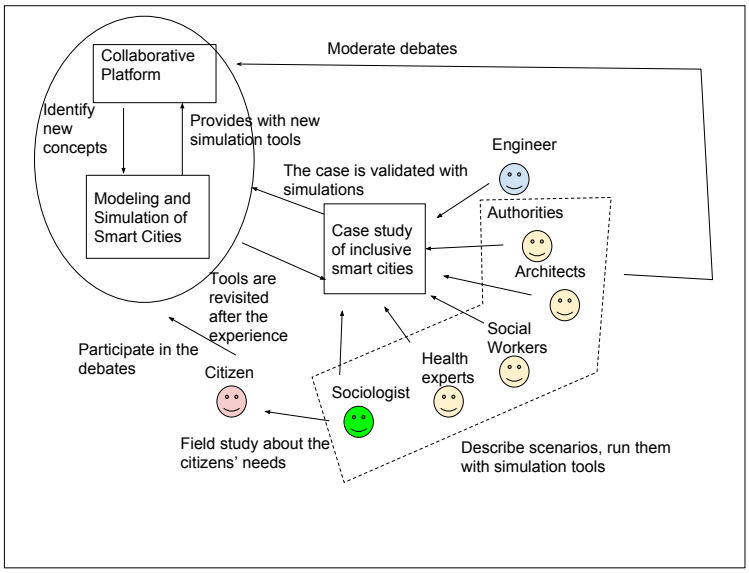


Fig. 2. Workflow of the collaborative platform to produce the simulations that define an inclusive smart city

It is expected that this method will produce not one, but a high number of simulations. These need to be organized to be properly consulted by the external parties, such as authorities or policy makers. Then, a second element of the proposal is a library of simulations commented for those in charge of building the actual smart city.

When the execution of the smart city is in progress, mechanisms to determine when the construction deviates from the plans are needed too. Engineers need to transfer back decisions made during the execution of the work. Unexpected

elements such as normative that prohibits certain constructions or the discovery of unexpected pipes that cannot be redirected and enforce to rethink the project. This re-design needs to keep in mind the requirements already discovered by the collaborative process. As previously pointed out, showing citizens that the smart city design is actually following their recommendations is a necessary condition for their long-term engagement.

5 Conclusions

This paper has introduced concepts related to inclusiveness and sustainability in smart cities. It has argued how difficult it is to develop smart city designs that consider both.

To address these problems, it has proposed the use of online tools that implement Social Sciences methods using realistic 3D simulations. Simulations can be effective communication and interaction tools to handle large groups of people within a collaborative platform. The paper has justified the use of 3D simulations, more specifically 3D crowd simulations, to communicate stakeholders what is being modeled. 3D simulations can communicate better the current smart city design decisions, according to literature. They could support the implementation of, for instance, focus groups and the DELPHI consensus method.

The paper has also pointed out some open challenges, such as how to avoid the predictable declining of participation in a long-term project, or handle the massive feedback from citizens. As a temporal fix, the use of consensus agreement processes, such as DELPHI, can be used to reduce this information to only those relevant agreements.

The ideas presented are work in progress, but are based into past research in all the mentioned areas. These include the computerization of the DELPHI process, generation of 3D simulations, or the consultation of large groups of people with a an online focus group approach.

6 Acknowledgements

We acknowledge support from the projects “Collaborative Ambient Assisted Living Design (ColoSAAL)” (TIN2014-57028-R), “Collaborative Design for the Promotion of Well-Being in Inclusive Smart Cities” (TIN2017-88327-R), and “Research Thematic Network on Smart Cities” (TIN2016-81766-REDT) funded by Spanish Ministry for Economy and Competitiveness; and the thematic network “CIUDADES INTELIGENTES TOTALMENTE INTEGRALES, EFICIENTES Y SOSTENIBLES” (518RT0558) funded by CYTED (Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo).

References

1. Chourabi, H., Nam, T., Walker, S., Gil-Garcia, J.R., Mellouli, S., Nahon, K., Pardo, T.A., Scholl, H.J.: Understanding smart cities: An integrative framework. In: 45th

Hawaii International Conference on System Science (HICSS 2012), IEEE (2012) 2289–2297
2. Ahvenniemi, H., Huovila, A., Pinto-Seppä, I., Airaksinen, M.: What are the differences between sustainable and smart cities? Cities **60** (2017) 234–245
3. Höjer, M., Wangel, J.: Smart sustainable cities: Definition and challenges. In Hilty, L.M., Aebischer, B., eds.: ICT Innovations for Sustainability. Volume 310 of Advances in Intelligent Systems and Computing. Springer (2015) 333–349
4. Sangiuliano, M., Glorioso, G.: Inclusive smart cities: a european manifesto on citizen engagement. Technical report, European Innovation Partnership on Smart Cities and Communities (EIP-SCC) (2016)
5. Lee, J.H., Hancock, M.G., Hu, M.C.: Towards an effective framework for building smart cities: Lessons from seoul and san francisco. Technological Forecasting and Social Change **89** (2014) 80–99
6. Greed, C.: Social town planning. Routledge (2002)
7. Comai, S., Kayange, D., Mangiarotti, R., Matteucci, M., Ugur Yavuz, S., Valentini, F.: Mapping city accessibility: review and analysis. Studies in Health Technology and Informatics **217** (2015) 325–31
8. McClimens, A., Partridge, N., Sexton, E.: How do people with learning disability experience the city centre? a sheffield case study. Health & place **28** (2014) 14–21
9. Killerby, P.: Social capital, participation and sustainable development: recent examples of inclusive consultation in new zealand. In: International Association for Community Development Conference. (2001) 2–6
10. Albino, V., Berardi, U., Dangelico, R.M.: Smart cities: Definitions, dimensions, performance, and initiatives. Journal of Urban Technology **22**(1) (2015) 3–21
11. Cities, S.: Big data, civic hackers, and the quest for a new utopia. Publishers Weekly **260**(33) (2013) 59
12. Sanoff, H.: Multiple views of participatory design. METU Journal of the Faculty of Architecture **23**(2) (2006) 131–143
13. Mattoni, B., Gugliermetti, F., Bisegna, F.: A multilevel method to assess and design the renovation and integration of smart cities. Sustainable Cities and Society **15** (2015) 105–119
14. Näkki, P., Antikainen, M.: Online tools for co-design: User involvement through the innovation process. In Karahasanović, A., Pierson, J., Vanattenhoven, J., Uyttendaele, A., eds.: New Approaches to Requirements Elicitation, The NordiCHI'08 Workshops. (2008) 91–96
15. Komninos, N., Tsarchopoulos, P., Kakderi, C.: New services design for smart cities: A planning roadmap for user-driven innovation. In: Proceedings of the 2014 ACM international workshop on Wireless and mobile technologies for smart cities, ACM (2014) 29–38
16. Zeile, P., Schildwächter, R., Poesch, T., Wettels, P.: Production of Virtual 3D City Models from Geodata and Visualization with 3D Game Engines. A Case Study from the UNESCO World Heritage City of Bambergs. na (2005)
17. Brasebin, M., Christophe, S., Jacquinod, F., Vinesse, A., Mahon, H.: 3d geovisualization & stylization to manage comprehensive and participative local urban plans. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences **4** (2016) 83
18. Nguyen, M.T., Nguyen, H.K., Vo-Lam, K.D., Nguyen, X.G., Tran, M.T.: Applying virtual reality in city planning. In Lackey, S., Shumaker, R., eds.: 8th International Conference on Virtual, Augmented and Mixed Reality (VAMR 2016). Volume 9740 of Lecture Notes in Computer Science. Springer (2016) 724–735

19. Bautista, S., Pavón, J., Cárdenas, M., Arroyo, J.: Design and specs of the co-rri web-based platform. Technical report, Project FoTRRIS (grant no. 665905) (2018)
20. Castillo, N.G., Bonett, M.C., Gomez-Sanz, J., Pavon, J.: Participatory design with online focus-group and normative systems. In: Advances in Artificial Intelligence - 18th Conference of the Spanish Association for Artificial Intelligence, CAEPIA 2018 (to be published). Proceedings. (2018)
21. Polèse, M., Stren, R.E.: The social sustainability of cities: Diversity and the management of change. University of Toronto Press (2000)
22. Pallot, M., Pawar, K.: A holistic model of user experience for living lab experiential design. In: 18th International ICE Conference onEngineering, Technology and Innovation (ICE 2012), IEEE (2012) 1–15
23. Gomez-Sanz, J.J., Pax, R., Arroyo, M., Cárdenas-Bonett, M.: Requirement engineering activities in smart environments for large facilities. Computer Science and Information Systems **14**(1) (2017) 239–255
24. Dillon, P.M., Noble, K.A., Kaplan, L.: Simulation as a means to foster collaborative interdisciplinary education. Nursing Education Perspectives **30**(2) (2009) 87–90
25. Fernández-Isabel, A., Fuentes-Fernández, R.: Extending a generic traffic model to specific agent platform requirements. Computer Science and Information Systems **14**(1) (2017) 219–237
26. Koene, A., Dowthwaite, L., Seth, S.: Ieee p7003^{TM} standard for algorithmic bias considerations: work in progress paper. In: Proceedings of the International Workshop on Software Fairness, ACM (2018) 38–41
27. Weber, B., Müller, P., Wonka, P., Gross, M.: Interactive geometric simulation of 4d cities. Computer Graphics Forum **28**(2) (2009) 481–492
28. Ferrández-Pastor, F.J., García-Chamizo, J.M., Nieto-Hidalgo, M., Flórez-Revuelta, F.: Dai virtual lab: a virtual laboratory for testing ambient intelligence digital services. Interaction **1**(2) (2013) 3
29. Fuentes-Fernández, R., Hassan, S., Pavón, J., Galán, J.M., López-Paredes, A.: Metamodels for role-driven agent-based modelling. Computational and Mathematical Organization Theory **18**(1) (2012) 91–112
30. Coe, A., Paquet, G., Roy, J.: E-governance and smart communities: a social learning challenge. Social Science Computer Review **19**(1) (2001) 80–93
31. Barbour, R.S., Morgan, D.L.: A new era in focus group research: Challenges, Innovation and Practice. Springer (2017)
32. Brown, B.B.: Delphi process: A methodology used for the elicitation of opinions of experts. Technical report, RAND Corp Santa Monica CA (1968)
33. García-Magariño, I., Gómez-Sanz, J.J., Pérez-Agüera, J.R.: A multi-agent based implementation of a delphi process. In: Proceedings of the 7th international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems-Volume 3, International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems (2008) 1543–1546
34. Gomez-Sanz, J.J., Fernandez, R.F.: Revisiting the delphi method for agents. In: International Conference on Practical Applications of Agents and Multi-Agent Systems, Springer (2015) 367–376
35. Huthwaite, B.: The lean design solution: a practical guide to streamlining product design and development. Institute for Lean Innovation (2007)
36. Bosch, P., Jongeneel, S., Rovers, V., Neumann, H., Airaksinen, M., Huovila, A.: Citykeys indicators for smart city projects and smart cities (2017)
37. Gomez-Sanz, J.J., Sánchez, P.C.: Domain independent regulative norms for evaluating performance of assistive solutions. Pervasive and Mobile Computing **34** (2017) 79–90

38. Alex-Assensoh, Y.M.: Democracy at risk: How political choices undermine citizen participation and what we can do about it. Brookings Institution Press (2005)

Design of a Microgrid Based on Renewable Energy Sources for an Aquaculture Centre

Marcus Silva[1,2], Vicente Leite[1], Dionízio Roman[1,3], Paulo Araújo[1,4], Wellington Maidana[1], José Batista[1]

[1] Instituto Politécnico de Bragança – Escola Superior de Tecnologia e Gestão
Bragança, Portugal
[2] Universidade Salvador – Salvador, Bahia, Brasil
[3] Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus de Cornélio Procópio
Paraná, Brasil
[4] Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus de Campo Mourão
Paraná, Brasil

pe.mpb@hotmail.com, avtl@ipb.pt, dionizioroman@hotmail.com,
phxaraujo@gmail.com, wellington-maidana@hotmail.com,
jbatista@ipb.pt

Abstract. This paper presents the design of a self-sustainable smart microgrid based on renewable energy resources – pico-hydro and photovoltaic – for Castrelos' Aquaculture Centre, in Bragança, Portugal. The proposed solution is a smart microgrid based on the SMA Flexible Storage System, connected to the main grid. The microgrid uses new technologies for energy management, production and storage and consists of a three-phase cluster of bidirectional inverters and a storage system based on batteries. The pico-hydro system uses a low head propeller turbine, with the generator connected to the microgrid by using off-the-shelf and widely available photovoltaic inverters.

Keywords: Smart Microgrids, Photovoltaic, Pico-Hydro.

1 Introdução

A procura de energia tem vindo a aumentar rapidamente, exigindo que as fontes de energia satisfaçam essa necessidade, resultando num aumento nos impactos ambientais e no aquecimento global. No entanto, como as fontes de energias renováveis são limpas e ilimitadas, estão a atrair, cada vez mais, a atenção de investigadores na área de energia [1].

Considerando o recente desenvolvimento de tecnologias de gestão e produção de energia, uma alternativa atrativa é a produção de eletricidade inserida no contexto de redes inteligentes (*smartgrids*), que potencia a exploração dos recursos locais e, consequentemente, a geração próxima do consumidor. Tal é possível devido a novas tecnologias de comunicação e controlo e topologias em cadeia como as microrredes [2].

Uma microrrede é um grupo de cargas interconectadas a recursos de energia distribuída dentro de limites elétricos claramente definidos que atuam como uma única entidade controlável em relação à rede e que pode se conectar e desconectar da rede para permitir que ela opere no modo conectado à rede ou em modo ilha [3]. Assim, apresenta vantagens que variam desde a resiliência até a integração renovável a qualquer tipo de fonte de energia (fotovoltaica, eólica, hídrica, biomassa, produção combinada de calor e eletricidade) e diferentes formas de armazenamento [4].

Os sistemas baseados apenas numa forma de geração podem resultar no sobredimensionamento de componentes, custos desnecessários de operação e redução da vida útil devido à natureza sazonal das fontes renováveis de energia. Estas limitações podem ser reduzidas combinando uma ou mais fontes renováveis de energia em sistemas híbridos [4].

Este artigo apresenta a conceção de uma solução energética para transformar o Centro Aquícola de Castrelos num edifício autossustentável, em termos médios anuais, através da integração numa microrrede inteligente, de diferentes sistemas de geração de energia baseados em fonte renováveis, de armazenamento e de gestão de energia. Esta iniciativa decorre no âmbito do projeto BIOURB NATUR – *Diversidade bioconstrutiva, edificação bioclimática, reabilitação sustentável e aplicação nos espaços naturais*, financiado pela Comissão Europeia – FEDER, POCTEP. As ações a realizar visam tornar este centro aquícola num polo de divulgação de novas tecnologias, conscientizar os visitantes e a população em geral, da importância da conservação daquele espaço e do meio ambiente e da utilização de fontes renováveis de energia.

Assim, a partir da caracterização do perfil e do potencial energéticos do Centro Aquícola de Castrelos, propõe-se uma solução baseada numa microrrede inteligente, que integrará geração solar fotovoltaica e pico-hídrica, aproveitando as suas potencialidades e infraestruturas existentes.

2 Caracterização Centro Aquícola de Castrelos

2.1 Descrição

No passado, a principal função do Centro Aquícola de Castrelos era a produção de truta para comercialização e para a realização de repovoamentos de cursos de água de aptidão salmonícola da região de Trás-os-Montes e Alto Douro.

Mais recentemente, e tendo como base um Protocolo de Colaboração entre o Instituto Politécnico de Bragança e o Instituto de Conservação da Natureza e das Florestas (ICNF), foram acrescentadas outros desafios relacionadas com a investigação e prestação de serviços à comunidade. No âmbito deste último, têm sido desenvolvidas várias ações de divulgação no Centro de Interpretação Ambiental, vocacionado para a sensibilização e educação ambiental do público em geral, com particular ênfase em crianças e jovens.

A Figura 1 apresenta o edifício principal do Centro Aquícola. É uma infraestrutura pertencente ao ICNF e situa-se junto ao rio Baceiro, perto da cidade de Bragança, Portugal. O edifício possui 2 pisos e telhado de duas águas com boa exposição solar. O primeiro piso serve de apoio à produção aquícola e o segundo tem o Centro de

Interpretação Ambiental e uma pequena habitação, utilizada esporadicamente. Dispõe, ainda, de um conjunto de tanques e reservatórios, abastecidos com água do rio através de um dique e de um canal, com cerca de 1 km de comprimento.



Fig. 1. Centro Aquícola de Castrelos.

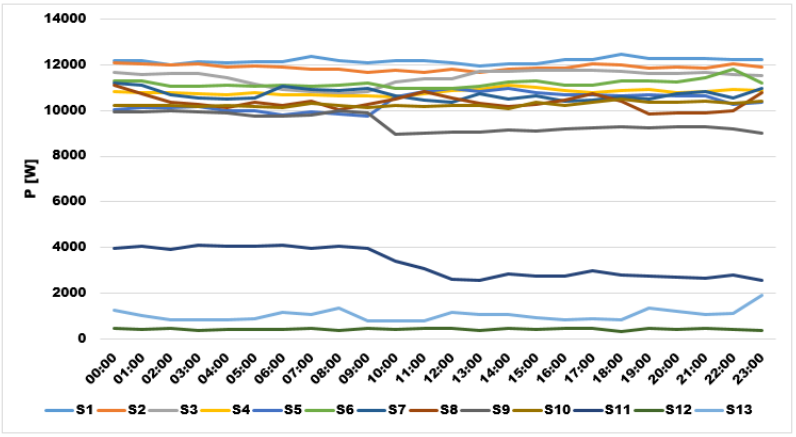
2.2 Caracterização Elétrica do Edifício

O fornecimento de energia é feito a partir da rede elétrica de serviço público, com base numa tarifa contratada de baixa tensão normal de médias utilizações (trifásica), e uma potência contratada de 41,4 kVA.

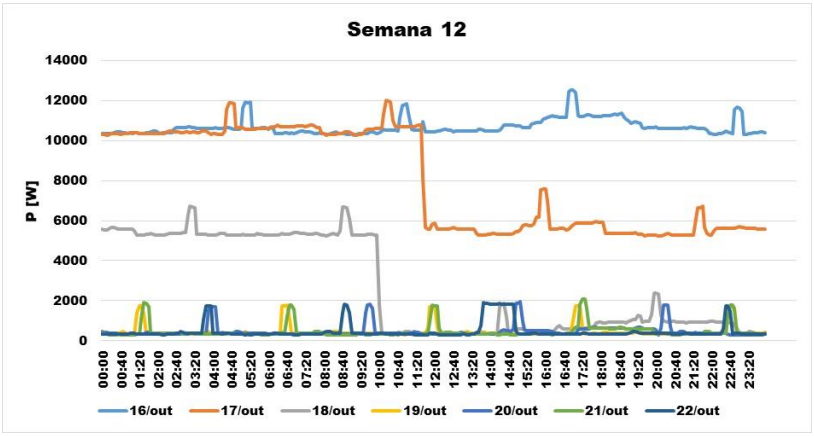
As cargas elétricas críticas da instalação, quer pela potência, quer pelo tempo de funcionamento, são duas bombas de água, com uma potência total de 10 kW. Com efeito, devido ao baixo caudal do rio nos meses de verão, o período de utilização das bombas é de 24 horas por dia, com o objetivo de garantir a temperatura e a oxigenação adequadas da água nos tanques. As restantes cargas elétricas são a iluminação dos tanques de alevinagem e do edifício; alguns aquecedores elétricos de utilização esporádica; uma bomba para fornecimento de água ao edifício e um cilindro elétrico para aquecimento de água quente sanitária.

Com base nas faturas de eletricidade é possível desagregar o consumo médio anual do verão e do inverno, sendo estes, 6,5 MWh e 2,2 MWh, respetivamente, totalizando 8,7 MWh/ano [5], considerando que o verão dura aproximadamente 4 meses.

Com o objetivo de caracterizar o perfil de consumo do edifício, foram adquiridos os diagramas de carga, como mostra a Figura 2, durante 13 semanas, no período de 7 de agosto a 5 de novembro de 2017. Este período inclui grande parte do período de bombagem e algumas semanas já com as bombas desligadas. Os diagramas de carga foram adquiridos com o analisador de energia PEL 103, do fabricante Chauvin Arnoux.



(a)



(b)

Fig. 2. Diagrama de cargas do edifício, durante as 13 semanas de monitorização (S1 a S13): (a) Média semanal e (b) semana 12, quando foram desligadas as bombas.

O período entre as semanas S1 a S10, apresenta valores de potência entre 10 kW e 12 kW (Figura 2a), que correspondem à utilização das bombas juntamente com as outras cargas do edifício. Entre as semanas S11 e S13 é possível notar a redução do consumo, que tem valores máximos de até 4 kWh, isto porque já não era necessário continuar a bombagem, devido à recuperação do caudal da água do rio. A Figura 2b apresenta os diagramas de carga da semana 12, durante a qual foram desligadas as duas bombas. Uma foi desligada no dia 17 de outubro, pelas 11h30 e a outra no dia seguinte, pelas 10h00. Em resultado destas ações, a potência baixou, respetivamente, 5,1 kW e 4,9 kW. A potência total das bombas é de 10 kW.

2.3 Caracterização do Potencial Energético do Edifício

Com base na análise da infraestrutura é possível estimar o seu potencial energético, designadamente, fotovoltaico e hídrico. Para este efeito, e relativamente ao aproveitamento fotovoltaico, apenas são consideradas as áreas das coberturas do edifício. Relativamente ao aproveitamento hídrico, apenas são consideradas as quedas de água existentes no interior do Centro Aquícola e o caudal disponível no canal de abastecimento do Centro. Com efeito, não está contemplada qualquer intervenção direta no rio para aproveitamento elétrico.

Para a instalação de módulos fotovoltaicos, considerando as características físicas do telhado, podem-se utilizar duas superfícies com áreas de 97 m² e 144 m². Ambas possuem orientação de –38º em relação ao sul, e inclinação de 31º. Utilizando o *software* PVGis [6], foi estimado um potencial de geração de energia fotovoltaica de aproximadamente 1,32 MWh, por ano, por kWp instalado.

O Centro Aquícola de Castrelos possui vários locais que possibilitam a instalação de turbinas pico-hídricas tirando proveito do caudal e das quedas de água, no percurso de abastecimento dos tanques e restituição da água ao rio. Pode-se estimar a potência gerada pela instalação de uma turbina pico-hídrica, utilizando a equação [7]:

$$P = 0{,}5 \times g \times h \times Q \approx 5hQ$$

Sendo h, a altura de queda bruta, em metros; Q o caudal, em l/s; g a aceleração da gravidade (9,8 m/s²) e 0,5 o fator que resulta das perdas no sistema, correspondendo a uma eficiência global de 50%.

O local mais favorável, apresentado na Figura 4, possui altura de 4,5 m. Para esta queda, a turbina tipo hélice, LH1500, da PowerSpout irá utilizar um caudal de 52,5 l/s e produzir uma potência de 1,24 kW [8].

Apesar de ambas as soluções apresentadas, fotovoltaica e pico-hídrica terem comportamento sazonal, essas têm a vantagem de se complementarem. A geração fotovoltaica tem elevado potencial de geração no verão, quando o caudal no canal é baixo ou inexistente, enquanto que, a pico-hídrica tem maior potencial de geração no inverno, quando o caudal do canal é maior.

Considerando um tempo de operação da turbina pico-hídrica em torno de 70%, devido a paragens por falta de caudal e para manutenção, estima-se uma geração de 29,5 kWh/dia, e 7,5 MWh anualmente. Este valor é 3.4 vezes superior ao consumo médio no inverno do Centro Aquícola, conforme registrado nas faturas de consumo.

Dessa forma, pode-se fornecer a energia necessária para o Centro Aquícola utilizando conjuntamente os recursos de geração fotovoltaica e pico-hídrica. Com o uso de um sistema de gestão e controle de energia, associado a um banco de baterias, pode-se aumentar o autoconsumo do edifício e reduzir a energia comprada à rede. Na próxima secção é proposta uma solução que engloba esses requisitos utilizando uma microrrede inteligente.

3 Caracterização da Solução

3.1 Medidas de Eficiência Energética

No âmbito da requalificação energética decorrente da implementação do projeto BIOURB NATUR, será executado um conjunto de medidas de eficiência energética. De entre elas, pela sua relevância, destaca-se a substituição das bombas atuais por uma bomba mais eficiente [5], alimentada por um variador de frequência, controlado com base da gestão de energia da microrrede que vai ser instalada. Esta ação vai permitir reduzir a potência para metade, mantendo o valor do caudal de bombagem atual em 15 l/s. O aquecimento, com base na utilização esporádica dos atuais aquecedores elétricos, e o aquecimento da água quente sanitária, com base no cilindro elétrico, serão integrados na gestão de energia da microrrede. Isto vai permitir aproveitar a energia, quando esta não puder ser consumida de outra forma e reduzir a energia solicitada à rede elétrica de serviço público, ou utilizar a energia da rede nos períodos em o seu preço é consideravelmente menor. Também a potência contratada deverá baixar, reduzindo, dessa forma, os custos fixos associados.

3.2 Microrrede baseada em energia fotovoltaica e hídrica

A solução que se apresenta, consiste na adoção de conceito emergente de geração distribuída de eletricidade e na gestão inteligente de energia elétrica, preservando a edificação existente, com pequenas adequações na sua infraestrutura, e utilizar os recursos naturais disponíveis no seu entorno, como é o caso do recurso hídrico disponível, do próprio circuito da água do Centro Aquícola, através da instalação de rodas de água e/ou de pequenas turbinas para sistemas pico-hídricos (até 5 kW), injetando a energia na microrrede que vai ser instalada. Esta microrrede é baseada na solução da SMA, designada por sistema de armazenamento flexível [9] [10], e foi projetada de acordo com o perfil de carga do Centro Aquícola de Castrelos para o aproveitamento eficaz da eletricidade gerada nas cargas do edifício.

Neste sistema, as principais funcionalidades são: visualização dos dados do sistema no Sunny Portal, controlo inteligente das carga, limitação de potência ativa dinâmica, carregamento da bateria baseado em previsão, limitação da potência ativa injetada na rede, limitação automática de carga desequilibrada, controlo de energia acumulada no ponto de ligação à rede elétrica de serviço público, acesso a serviços de gestão de rede via interface Modbus para, por exemplo, limitação de potência ativa pelo operador da rede.

O Sistema de Armazenamento Flexível da SMA suporta o aumento do autoconsumo através das seguintes medidas: armazenamento temporário de energia em excesso, no banco de baterias (48 V) conectado aos conversores Sunny Island; controlo de cargas e monitorização dos sistemas de produção com o Sunny Home Manager.

É importante destacar que neste projeto há a premissa de não ser injetada potência na rede, pelo que toda a energia produzida ao longo do dia deve ser utilizada pelas cargas e a excedente armazenada no banco de baterias, aumentando o nível de autossustentabilidade do Centro Aquícola em relação à geração e ao consumo de eletricidade.

Desta forma, como ilustrado na Figura 3, o projeto da microrrede inteligente para o Centro Aquícola de Castrelos inclui um *cluster* formado por três conversores bidirecionais Sunny Island 6.0H, na configuração mestre-escravo; um inversor Sunny TriPower STP 10000TL-20; um Sunny Home Manager 2.0; 24 baterias A602/625 Sonnenschein Solar e 32 módulos fotovoltaicos REC Solar AS REC 330 TPS 72. Na fase atual de desenvolvimento do projeto, também está prevista uma turbina pico-hídrica LH450HP da PowerSpout; um quadro elétrico dedicado; circuitos de proteção e seccionamento. Ainda está em análise a possibilidade de usar rodas de água, em alguns locais, como por exemplo, em algumas descargas de água para os tanque e restituição ao rio.

A ligação de turbinas pico-hídricas à microrrede pode ser feita utilizando soluções inovadoras com inversores fotovoltaicos convencionais, como demonstrado em [11]-[14]. Assim, para cada turbina pico-hídrica ou roda de água, será adicionado um inversor fotovoltaico Sunny Boy 1.5-1VL-40.

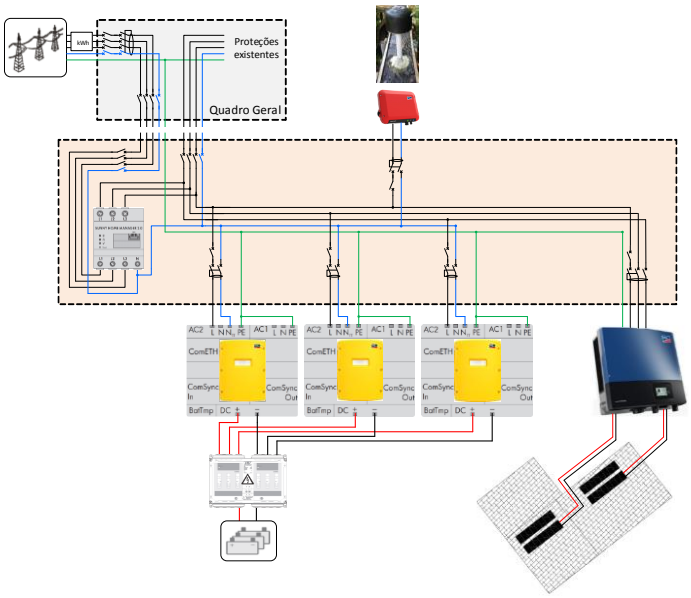


Fig. 3. Esquema da microrrede para o Centro Aquícola de Castrelos.

3.3 Sistema de Geração Fotovoltaica

Na especificação dos módulos fotovoltaicos para a microrrede, foram considerados os fatores custo, tecnologia atualizada, rendimento e adequação à gama MPPT do inversor. Desta forma, foram selecionados módulos da REC Solar, modelo REC 330 TPS 72, tecnologia Twin peak [15].

A matriz fotovoltaica é constituída por duas fileiras (*strings*), com dezesseis módulos cada, a instalar em duas faces do telhado, com azimute -38° em relação ao sul, e inclinação de 31°. As fileiras são conectadas a entradas do inversor Sunny TriPower STP 10000TL-20 da SMA, que possui duas entradas MPPT independentes.

Pela simulação realizada no programa Sunny Design da SMA, prevê-se um autoconsumo fotovoltaico de 15,66 MWh/ano, atingindo uma quota de autoconsumo de 98%. Desta análise resulta que, como a quota de autoconsumo é relativamente alta, a quota de autossuficiência é muito baixa.

Numa fase posterior, a instalação do sistema fotovoltaico deverá ser reanalisada, uma vez que a energia produzida tem de ser consumida localmente. Concretamente, as duas entradas MPPT independentes do inversor fotovoltaico, podem ser utilizadas de forma eficaz, para extrair a potência das fileiras, posicionadas convenientemente, e dessa forma, distribuir a produção ao longo do dia e diminuir os requisitos de armazenamento.

3.4 Geração Pico-hídrica

A turbina a ser instalada é do tipo hélice, para baixas quedas, de 1 m até 5 m, com caudais até 56 l/s, modelo LH450HP da PowerSpout, que integra um gerador de ímanes permanentes com potência de 1421 W às 1536 rpm. A tensão DC é de 212 V em carga e 450 V em vazio. A corrente DC é de 6,7 A em carga e 13 A em curto circuito.

Sendo uma turbina de reação, a hélice precisa de estar submersa para garantir o seu funcionamento normal [7] [16]. Como ilustra a Figura 4, serão utilizadas as infraestruturas já existentes no local, com a construção de um pequeno canal para a colocação da turbina. Estima-se que o caudal seja suficiente para produção de energia durante 70% do ano, 24 horas por dia.

A ligação da turbina pico-hídrica à microrede será feita utilizando soluções inovadoras, baseadas em inversores fotovoltaicos convencionais. Esta solução já foi testada e validada [11] - [14]. O inversor fotovoltaico escolhido é o Sunny Boy 1.5-1VL-40 da SMA. Nestes casos, como nas turbinas eólicas, é necessário um circuito de proteção para evitar sobretensões devidas ao funcionamento em vazio do gerador.

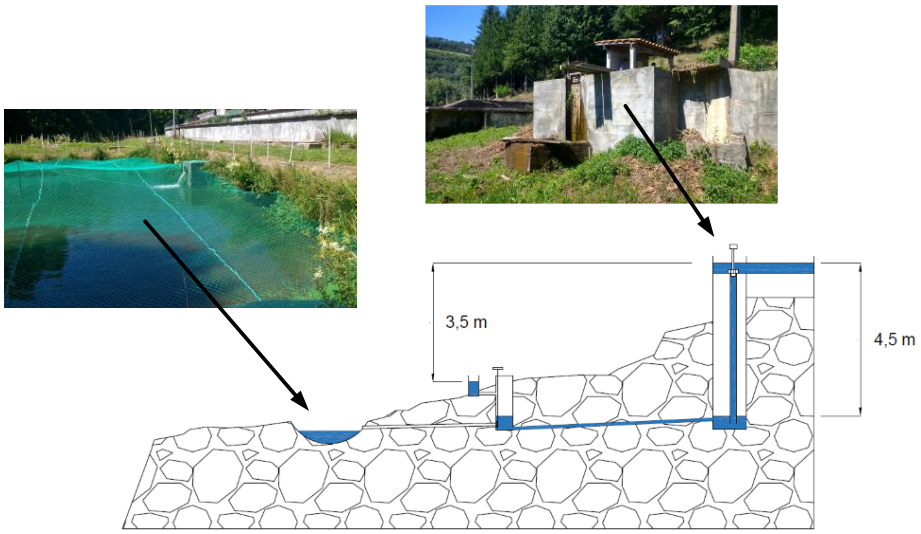


Fig. 4. Ilustração da pico-hídrica a ser instalada no Centro Aquícola de Castrelos.

3.5 Dimensionamento das baterias

De acordo com a estimativa obtida no PVGis [6], e para a localização do Centro Aquícola, a potência tem a forma da curva apresentada na Figura 5. Ao inserir os dados do módulo fotovoltaico selecionado, na expressão abaixo, é possível estimar a curva de geração de potência PV.

$$P(kW_p) = Área\ do\ módulo\ (m^2) \times n.º\ de\ módulos \times rendimento\ (kW_p/m^2)$$
$$= (1{,}675 \times 0{,}997) \times 32 \times 0{,}175 = 9{,}35\ kW_p$$

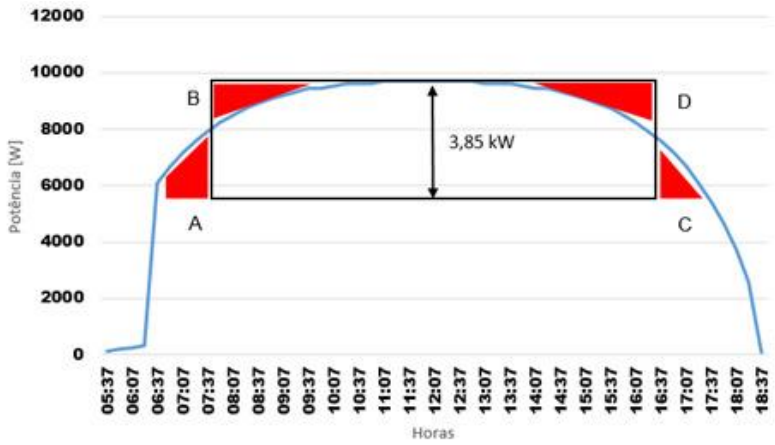


Fig. 5. Curva da estimativa de geração fotovoltaica média em junho (verão).

A curva da Figura 5 foi utilizada para estimar a capacidade do banco de baterias que deverá armazenar o excesso de produção PV. Assim, considerando as perdas, a melhor produção fotovoltaica do ano, uma potência estimada para as cargas igual a 6 kW (após a substituição das duas bombas por uma nova), e pelo formato da curva (as áreas A + C e B + D são aproximadamente iguais), podemos estimar a energia excedente, que deverá ser armazenada. Então:

$$E \approx 8\ h \times (9{,}35 - 6)\ kW \approx 27\ kWh \ \rightarrow\ C \approx \frac{27\ kWh}{48\ V} \approx 563\ Ah$$

Para armazenar a energia de 27 kWh, com uma profundidade de descarga (DOD) não superior a 50%, e para prolongar a vida da bateria, seria necessário um banco de baterias com o dobro da capacidade obtida. Assim, em vez de adquirir um banco de baterias com uma capacidade maior, a solução passará por instalar as duas fileiras fotovoltaicas com inclinações adequadas para reduzir a potência de pico e aumentar o número de horas de produção, designadamente ao final da tarde. Desta forma, podem utilizar-se as duas entradas MPPT do inversor fotovoltaico, e a produção é melhor distribuída ao longo do dia.

Ao analisar os modelos disponíveis no mercado e os custos envolvidos, foi definida uma capacidade de 625 Ah, e selecionado o modelo A602/625 da Sonnenschein Solar. Assim, foram especificados 24 blocos A602/625, de 2 V cada, formando um banco de baterias de 48 V e 625 Ah.

4 Resultados

Nesta seção são apresentados os resultados esperados com as medidas propostas, com o objetivo de tornar o Centro Aquícola de Castrelos autossustentável, em termos médios anuais. Com base nas faturas de energia, pode-se verificar que a média de consumo anual é de 8,7 MWh e pode ser reduzido, após a implementação das medidas de eficiência energética referidas na secção 3.1. Pelos dados disponíveis, o consumo no inverno é 2,2 MWh e no verão é de 6,5 MWh. O aumento do consumo no verão decorre da ligação das duas bombas, com uma potência total de 10 kW.

Estima-se que, futuramente, o consumo médio do verão seja em torno de 50% do valor atual devido à substituição de duas bombas com potência total de 5 kW, por uma de 5,5 kW, mas fornecendo o mesmo caudal. Com a microrrede, que vai ser instalada, será possível fazer uma gestão inteligente do conjunto das cargas, incluindo a bombagem. Com base nestes pressupostos, foi projetada uma produção de energia suficiente para satisfazer o consumo estimado.

A geração pico-hídrica, apesar da sua natureza sazonal, apresenta várias vantagens. Como a potência a instalar é baixa (1,42 kW), mas funciona 24 horas por dia, garante uma produção diária de 29,5 kWh. Estima-se que a energia produzida pela turbina pico-hídrica seja de 7,54 MWh no inverno. A energia estimada para o sistema fotovoltaico é de 15,66 MWh/ano, de acordo com a análise feita com o programa Sunny Design. No Centro Aquícola de Castrelos, estas fontes de energia são

complementares porque no verão há muita radiação e caudal insuficiente, prevalecendo a produção fotovoltaica, enquanto que, nos meses de inverno (consideravelmente prolongado), a produção hídrica complementa a fotovoltaica.

Nos períodos diários em que a energia produzida não seja suficiente, a restante virá da rede elétrica de serviço público. Quando houver produção excessiva, a sua utilização será gerida pela microrrede, dissipando-a em cargas utilizadas na climatização do edifício.

5 Conclusão

Este trabalho apresenta a conceção de um sistema autossustentável, projetado para o Centro Aquícola de Castrelos, próximo da cidade de Bragança, Portugal. O sistema é baseado numa microrrede inteligente, ligada à rede convencional, e integra fontes renováveis de energia, com tecnologias inovadoras para geração, gestão, armazenamento e consumo da energia, de forma controlada, flexível e inteligente. Este projeto explora os dois principais recursos disponíveis, designadamente fotovoltaico e hídrico.

Com base na análise de perfil de consumo do edifício, foi estimada uma geração que garante a autossustentabilidade do centro aquícola em termos médios anuais. Para estimar os valores de produção fotovoltaica e da pico-hídrica, foram utilizadas informações reais de geração, para garantir a viabilidade de implementação do projeto. A unidade de produção pico-hídrica pode ser instalada apenas com algumas modificações na infraestrutura já existente. A instalação elétrica manterá o sistema trifásico existente, mas a microrrede será baseada num *cluster* de 3 inversores bidirecionais ligados a um banco de baterias, para otimizar o balanço entre a energia produzida e consumida.

De realçar ainda, o aspeto inovador da utilização de inversores fotovoltaicos para integração da pico-hídrica na microrrede. A solução consiste em ligar a tensão (retificada) do gerador, diretamente à entrada de um inversor fotovoltaico que realiza a interface com a microrrede. Para isso, é necessária a utilização de um circuito de proteção para limitar a velocidade do gerador e a tensão à entrada do inversor, em situações transitórias, em que o gerador fica em vazio. Esta estratégia já foi validada em laboratório.

Deste modo, a solução de gestão de produção e consumo de energia, baseada numa microrrede inteligente, apresentada nesse artigo, servirá como um polo de disseminação de novas tecnologias, baseadas em fontes renováveis de energia, já que o Centro Aquícola de Castrelos é aberto ao público.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Programa de Cooperação INTERREG V - A Espanha-Portugal (POCTEP) o apoio financeiro concedido no âmbito do projeto BIOURB-NATUR, ao Instituto de Conservação da Natureza e das Florestas (ICNF) o apoio na implementação física do projeto, à ESTiG-IPB pelo apoio nos testes laboratorias, ao

Amílcar Teixeira, Rui Oliveira, Luís Queijo e Vitor Gomes, o apoio nas atividades realizadas.

Referências

1. O. Hefez e K. Bhattacharya, “Optimal planning and design of a renewable energy based supply system for microgrids,” Renewable Energy, vol. 45, pp. 7-15, 2012
2. H. Tai e E. Hogain, "Behind the Buzz: Eight smart-grid trends shaping the industry," IEEE Power and Energy Magazine, vol. 7, no. 2, Mar. 2009.
3. A. Hirsch, Y. Parag e J. Guerrero. “Microgrids: A review of technologies, key drivers, and outstanding issues”. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 90, pp. 402-411, 2018.
4. G. Bekele e G. Tadesse, “Feasibility study of small Hydro/PV/Wind hybrid system for off-grid rural electrification in Ethiopia,” Applied Energy, Volume 97, 2012, Pages 5-15.
5. S. Brito. Centro Aquícola de Castrelos. Instituto Politécnico de Bragança. Dissertação de mestrado apresentada à Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Bragança, 2016.
6. PVGis. https://photovoltaic-software.com/pvgis.php last accessed 2018/07/06.
7. A. Harvey. “Micro-Hydro Design Manual: a guide to small-scale water power schemes.” nº 621.24/H341. Intermediate Technology Publications, 1993.
8. ECOINNOVATION. PowerSpout Installation Manual. 2012.
9. SMA FLEXIBLE STORAGE SYSTEM - System description. SI44M-80H-12-FSS-IA-en-10, Version 1.0. 2017 http://files.sma.de/dl/30486/SI44M-80H-12-FSS-IA-en-10.pdf last accessed 2018/06/19
10. SMA SMART HOME - Planning Guidelines. SI-HoMan-PL-en-50, Version 5.0. 2017 https://zerohomebills.com/wp-content/uploads/Planning-Guidelines-SMA-SMART-HOME-The-System-Solution-for-Greater-Independence.pdf last accessed 2018/06/19
11. V. Leite, A. Ferreira, J. Couto e J. Batista, “Compatibility Analysis of Grid-connected Pico-hydro Systems using Conventional Photovoltaic Inverters”, 18th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE 2016), Karlsruhe, Germany, 6-8 setembro 2016.
12. V. Leite, A. Ferreira, J. Couto e J. Batista, "A Pratical Approach for Grid-connected Pico-hydro Systems using Conventional Photovoltaic Inverters", IEEE International Energy Conference (ENERGYCON), 4-8 abril 2016.
13. V. Leite, A. P. Ferreira, J. Couto e J. Batista, “Grid-connection approaches for pico-hydro systems.” II Congresso Ibero-Americano de Empreendedorismo, Energia, Meio Ambiente e Tecnologia - CIEEMAT 2016, 8-11 novembro 2016.
14. V. Leite, A. P. Ferreira, J. Couto e J. Batista, “Pico-hydro Systems: Microgrid-Connection approaches”, IV Congreso Iberoamericano Sobre Microrredes con Generación Distribuida de Renovables, Concepción, Chile, 27-28 outubro 2016.
15. PANASONIC. Photovoltaic module HIT VBHN295SJ46 https://eu-solar.panasonic.net/cps/rde/xbcr/solar_en/VBHN295SJ46_EN.pdf last accessed 2018/05/18

16. PRACTICAL ACTION. "Micro-hydro power." Fact Sheet (2014) https://practicalaction.org/micro-hydro-power-4 last accessed 2018/06/21.

Solar intermittency with Spline fit modeling. Microgrid case CEDER, Soria, Spain

López-Meraz R. A.[1[0000-0002-3236-3709]], Hernández-Callejo L.[2[0000-0002-8822-2948]], Jamed-Boza L. O. [1[0000-0002-6378-758X]], Víctor Alonso-Gomez[2 [000-0001-5107-4892]]

[1] Universidad Veracruzana, Circuito Universitario Gonzalo Aguirre Beltrán s/n, 91000, Mexico
[2] Universidad de Valladolid, Campus universitario Duques de Soria s/n, 42004, Spain
meraz_raul@hotmail.com: R.L-M.; luis.hernandez.callejo@uva.es: L.H-C.; lojb33@gmail.com: L.J-B.; victor.alonso.gomez@uva.es: V.A-G.

Abstract. The natural variations on solar radiation have caused that the photovoltaic technology is not fully incorporated into the global electrical networks, despite favouring environmental aspects and being, nowadays, one of the main aims for the generation of electricity. This article proposes to determine the solar intermittences by setting its duration and the power that is lost in each of the months, taking as a case study information from the micro-grid of the Centre for the Development of Renewable Energies (CEDER), belonging to the Centre for Energy, Environmental and Technological Research (CIEMAT), located in Soria, Spain. Data acquisition period was from May 30th, 2012 to March 3rd 2015 with the help of a *Baseline Surface Radiation Network* (BSNR). The analysis is based on the determination of monthly frames of reference for radiation with a third degree spline adjustment with smoothing, using JMP statistical application software. The results of analyses have provided important information to understand the unstable appearance of solar radiation and, in turn, may be the basis of a control system to optimize the *in situ* photovoltaic production of said microgrid.

Keywords: Loss of energy, Radiation, Spline fit.

1 Introduction

In recent years the trend of energy markets has led to a revival in the interest of on-site small-scale power generation, preferably renewable, called distributed or decentralized generation (DG) [1, 2]. Some factors contributing to the development of this kind of generation are limitations associated with the building of new transmission lines, satisfying the increasing consumer demand and the concern of climate change [2]. The penetration of DG into micro grids is rapidly growing, achieving a high percentage of installed capacity. However, randomness associated with inputs of this kind of energy, like wind and solar radiation, causes variations in the flow of energy affecting significantly the normal operation of electrical systems [3]. This situation leads to important problems in the security of the micro grids, as well as fluctuations in the frequency of

the system and restrictions for the qualification of power lines [4]. Therefore, intermittency complicates the adoption of solar energy in electric networks, since reliable and predictable generation is required.

There are different ways of dealing with the inconvenience of intermittency, among them the main ones are the distributed energy storage (DES) and the intelligent networks. However, in order to ensure safeness and efficient operation, a forecast for the behaviour of the solar radiation is necessary. Previous research has pointed out that photovoltaic intermittency can be anticipated by using numerical models of weather forecast and through analysis of satellite imaging [5, 6]. Despite this, in recent research papers, there are no methodologies considering solar intermittently with low levels of uncertainty using historical data from radiation, creating frames of reference for designing reliable backup system.

The present work proposes a way for the identification and quantification of the concept of solar intermittency using as reference model the cubic spline fitting with smoothing in the micro-grid of the Centre for the Development of Renewable Energies (CEDER) belonging to the Centre for Environmental Energetic and Technological Research (CIEMAT) located at Soria, Spain. This tool has been used to respond to various problems, among them is the association of environmental variables with radiation [7], the forecast of the demand for electric power [8], [9] contact surface profiles analysis, and location and simultaneous mapping for mobile robots [10]. Thus, in this document is found the frequency of the number of intermittences at 50, 75 and 90 % of their appearances, as well as the radiant power to cover in the same percentages. We begin, in section 2, describing the case of study and the characterization of the frame of reference, as well as the definition of intermittency. In section 3, we show the most important results of the analysis and, finally, the conclusions and ideas for future work are expressed in point 4.

2 Materials and methods

2.1 Case of study

The information used in this analysis was provided by CEDER through a Baseline Surface Radiation Network (BSNR) measuring the solar radiation *in-situ*. The period of the radiation information was from May 30, 2012 to March 3, 2015, in total 442,905 five-minute records. Prior to processing, irregularities were found in measurements. They include the following: (a) absence of continuous and permanent records and (b) shifts in the time zones due to causes beyond the measurement, so information was adjusted in accordance with the corresponding GMT (zero, Soria 2.4 ° West).

The criterion to define the period of analysis was as follows: if it were done on a daily basis, there would be 28, 30 or 31 different characterizations producing an impractical situation, due to the amount of information, and a conclusion of the monthly behavior would not be obtained. If the samples were half-yearly, the seasons of the year would not be considered. If the period of study were every three months, it would involve the seasons, however, they do not necessarily behave similarly. Therefore, it was decided to carry out the study for monthly periods since, around the days 20-23, there

is an official change of season, but its characteristics are not yet reflected; that is to say, there are months of transition (March, June, September and December) where the seasonal particularities are not completely fulfilled. On the other hand, this period corresponds, in general, to that of electric billing.

2.2 Monthly reference for solar radiation

The frame of reference closest to the reality of global radiation was chosen among the following tools:

- Classical statistical regression, avoids the randomness and tends to create a function that minimizes them, finding the tendency of the data set.
- Series of time, tries to follow more the experimental points without minimizing. It tends to average the vertical values between the contiguous horizontals.
- Spline fit with smoothing (smoothing spline b-spline).

A conservative criterion was sought, i.e., to anticipate what has happened and what is intuited can happen in order to locate how radiation behaves in a present time. The first two options tend to go to extremes. In this way, it was preferred to use the numerical method of spline type adjustment with third degree smoothing, which is the most useful when it is desired to achieve a trend in the function and, in turn, reflect frequently consistent randomness. This type of adjustment is non-parametric in the sense that it does not have coefficients of some polynomial function that fully represents the state of the system. However, it turns out to be highly satisfactory when the response of the system tends to be variant and oscillating in which traditional methods, such as least squares, fail. It is worth mentioning that the ideal behaviour would be a Gaussian curve without any environmental oscillation.

2.3 Spline fitting

Parametric models usually adopt patterns of the normal distribution in its variations inherent in the measurement technique, which means that many events may differ numerically with the fitted model. Non-parametric adjustments are all those that do not obtain a functional relation such as $Y = f(x_1, x_2, \dots, x_p)$.Consequently, they do not necessarily use statistical techniques. In particular, the spline model fits to the behaviour of the (sometimes oscillating) information, with any trend, whose distribution function is not known or the characterization of the curve is not easy to solve in a conventional way, that is to say, it does not assume, *a priori*, a functional form [11]. This setting has the particularity of unite polynomials by segments through nodes, avoiding producing acute changes in the smooth curve of the model allowing the combination of this type of functions.

The spline model plays an important role in the area of engineering essentially due to its favourable properties in oscillating interpolation, its structure of segmented polynomials and their low complexity of implementation [12]. In this sense, cubic polynomials are the most used because they present an excellent fit to the nodes to admit

change of curvature, optimizing the variation of the adjustment model and its improvement is based on the number of observations considered [13]. According to [14], the decisive reason for its use is the continuity (calculating a polynomial between each pair of consecutive points), ensuring that the first and second derivative of each polynomial at each node are equal. That is, the spline adjustment does not behave as a single polynomial, achieving a unique smoothed curve.

The adjustment type *spline* with smoothing technique corresponds to the area of numerical methods in conjunction with the calculus of variations. To achieve the characteristics mentioned, the function, the first and the second derivative valued at each x-coordinate, should be same. If we have the set of points (x_i, y_i), the original observed information with $i = 1, 2, \dots, n.$, where each x_i can easily be extended to the case of confluent abscissa, meaning that each "x" may contain more than one "y" with some degree of dependency between the adjacent "x´s", obtaining a cubic polynomial between each pair of consecutive points is defined with a local variable $t_i = x - x_i$ and their corresponding domain $h_i = x_{i+1} - x_i$ generating $(n-1)$ polynomials whose function, first and second derived are:

$$f = a + bt + ct^2 + dt^3 \tag{1}$$

$$f' = b + 2ct + 3dt^2 \tag{2}$$

$$f'' = 2c + 6dt \tag{3}$$

To solve the function f in (1) and get their four coefficients, are required conditions of continuity in $t = 0 \; and \; t = h$, where the function f must coincide, the first derivative $f'$and the second derivative f'' at the ends of each polynomial.

The parameter of smoothing lambda (λ) comes from the formulation of the equations of Euler-Lagrange. When λ tends to zero, the resulting curve (presents "greater acuity" vertical) is the classic cubic C-Spline interpolation [15,16]. When tends to infinity, the resulting curve tends to the line obtained by least squares adjustment. The Euler-Lagrange equations require a joint minimization of the following expression:

$$\int_{t_{x_1}}^{t_{x_n}} g''(t)^2 \, dt + p\left\{\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{g(t_{x_i})-y_i}{\delta y_i}\right)^2 + z^2 - S\right\} \tag{4}$$

In the above expression, $\boldsymbol{t}_{x_i}$ is the local variable of each polynomials, $g(t_{x_i})$ is the joint function of the $(n-1)$ polynomials valued in x_i. The lagrangian parameter p must comply with the expression $pz = 0$ in the obtained minimization. The δy_i are the values that allow to create weightings in the expression calculation process. The auxiliary variable z allows maintaining congruence in the condition $pz = 0$ that is required to comply. The variable S is a function of the smoothing parameter λ so that their behavior is similar. Deeper information about the theoretical spline interpolations family development are in suggested references [17,18]. The shape and smoothness of a spline relies heavily on this value of smoothing, which is selected from a measure that balances the bias and variance of this class of estimators [19].

2.4 Characterization of the frame of reference

In addition to the considerations listed in section 2.3, the value λ to be used was decided with the criterion of increasing the value of the coefficient of determination (R^2) while maintaining a smooth line (low acuity). In this case of study, λ remained constant in 10.000 by consistency conditions. Each x-coordinate is confluent and middle vertical responses are obtained to pondering the closest observed values with greater weight. The splines monthly adjustments were accomplished with JMP statistical application software [20]. When making the decision to characterize the radiation for monthly periods, every five minutes, it is required to obtain a curve that represents each month; this can be parameterized with functions, generally, of third degree or higher with a good R^2 that measures the predictive quality of the model used (its square root represents the correlation coefficient). Thus were obtained 12 characteristic polynomial functions with high correlations with respect to each setting original spline.

2.5 Intermittence

To use the b-spline function it was necessary to define the concept of solar intermittency, understood as the decrease in the amount of radiant power, which is function of the geographical position (spatial scale) and the moment in which it is present (scale temporal), received in a place determined by means of a reference pattern.

To identify and quantify the number of intermittencies, the difference between the measured radiation and the one found with spline adjustment indicates the absence or presence of intermittence. If it is negative, it shows his existence in that reading (x) and its magnitude is the amount of power that must supply a back-up system. Individual 5-minute or contiguous intermittent events of longer duration are expected, the adjacent intermittences and their power deficit being accumulated.

3 Results

3.1 Monthly solar radiation

The behaviour of the horizontal global radiation in monthly scenarios is presented in Fig. 1, where it can be observed the measured points with the obtained spline fitting. It is remarkable the presence of two types of days in each month, except in July and August where this difference disappears. The beginning and end of radiation, as it is might expected, varies depending on the month, in this regard, it is notable that numbers from reading in the summer months lengthen and shorten in the cold months. The spline radiation peaks reach 800 W/m^2 in July and August, and 350 W/m^2 in December and January. The correlation coefficients oscillate between 0,6644 to 0,8931, where the minors correspond to the months of November and March, representing in the spring and fall seasons are of greater dispersion in the information and in the summer are greater approaches.

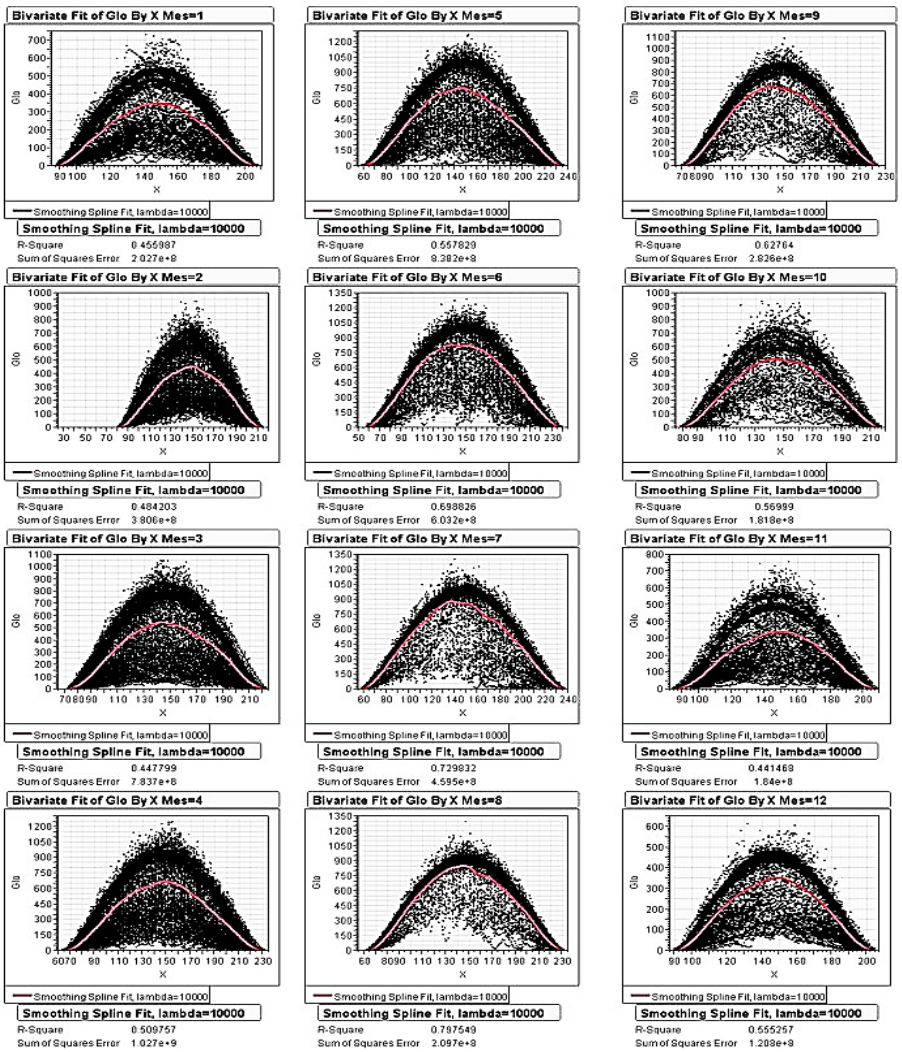


Fig. 1. Test points with monthly spline adjustment on the CEDER.

3.2 Frame of reference characterization

Table 1 shows that best values of R^2 and R^2_{Adj} are presented in summer months. On the other hand, the polynomials are adjusted with high values of determination, i.e., the worst month (March) has an R^2 of 0,997, which indicates that outstanding adjustments were achieved; the orders of the monthly polynomials are of 4° and 5°, respectively. The annual analysis presented its best approach with a function of 6th order. In this last

analysis, the maximum daily value does not exceed 600 W/m^2 on average daily. The regressions were elaborated at 5 % of significance ($\alpha = 0{,}05$), being significant all the β coefficients. Correlation model is:

$$Y_s = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 x^2 + \beta_3 x^3 + \beta_4 x^4 + \beta_5 x^5 \quad (5)$$

Table 1. Polynomial coefficients of spline fitting.

Y(s)	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	β_6	R^2_{Spline}	R^2_{Poly}
January	5363,40	-184,14	2,19	-0,011	1,80e^{-5}	0	0	0,456	0,999
February	3995,66	-147,08	1,84	-9,09e^{-3}	1,54e^{-5}	0	0	0,484	0,999
March	1824,19	-83,11	1,18	-6,17e^{-3}	1,06e^{-5}	0	0	0,448	0,997
April	2005,66	-89,01	1,27	-6,63e^{-3}	1,14e^{-5}	0	0	0,509	0,999
May	3093,70	-143,05	2,29	-0,015	4,51e^{-5}	-4,96e^{-8}	0	0,558	0,999
June	482,64	-40,20	0,77	-4,37e^{-3}	7,65e^{-6}	0	0	0,699	0,998
July	2593,38	-126,41	2,08	-0,014	3,93e^{-5}	-4,10e^{-8}	0	0,729	0,998
August	3665,83	-168,44	2,66	-0,017	5,12e^{-5}	-5,56e^{-8}	0	0,797	0,999
September	5436,14	-232,68	3,53	-0,023	6,99e^{-5}	-7,90e^{-8}	0	0,628	0,999
October	6225,44	-240,55	3,33	-0,020	5,58e^{-5}	-5,64e^{-8}	0	0,570	0,999
November	5198,98	-177,68	2,11	-0,010	1,72e^{-5}	0	0	0,441	0,999
December	6664,63	-224,12	2,63	-0,013	2,14e^{-5}	0	0	0,555	0,999
Year	-6260,11	339,97	-7,43	0,083	-4,82e^{-4}	1,40e^{-6}	-1,61e^{-9}	0,339	0,998

3.3 Intermittencies

According to the previous relationships, the accounting powers and intermittences are presented in Table 2.

Table 2. Quantification of intermittencies and its power.

Scenario	N	I ≤ 50	I ≤ 75	I ≤ 90	P ≤ 50	P ≤ 75	P ≤ 90
January	608	3	10	27	98,3434	565,6	2298,29
February	922	3	8	22	135,005	518,771	2594,29
March	1029	3	8	20	174,54	700,096	2999,96
April	1240	3	8	21	253,786	1027,24	3546,14
May	1099	2	6	17	231,496	740,902	2732,03
June	1159	2	5	12	221,247	788,056	2333,1
July	802	2	5	14	175,032	692,386	2066,56
August	579	3	6	16	222,85	685,05	1936,69
September	555	2	6	17	234,526	747,619	2542,57
October	518	3	7	16	155,279	600,493	2110,45
November	664	3	9	27	111,992	461,274	1861,72
December	548	3	8	25	68,6829	385,447	1939,83

Minor-equal intermittences at 50, 75 and 90 % are appreciated, as well as the deficits of their powers. As shown in Table 2, in all months there were at most three intermittencies up to 50 % of them, with a maximum period of 15 minutes, December would

need less supply because its deficit is 68,6829 W/m^2. On the other hand, the maximum duration of 75 % of the intermittencies was 50 minutes, although the monthly average does not exceed 40 minutes. At 90 % the interval ranges from one hour to two hours with 15 minutes. It is remarkable that cold months are the ones which present the greatest number of intermittencies in the three categories, however, their deficits at 50% are the lowest with an average lower than 100 W/m^2. Obviously, it is observed that the month with the highest power insufficiency is April. It is noteworthy that there are 5 months (May-September) with very similar conditions on the number of intermittencies and their power deficits. Arguably, the best month, both in number of intermittencies and their deficits, is July. The annual analysis was omitted because it leaves out useful information to determine the support power of each month because it does not reflect the monthly or seasonal behaviours, hiding their random variations.

On the other hand, [21] mentions that most intermittences produce a decrease in power of 20-30 % and that these remain less than a minute. It also ensures that, if the interruptions are kept up to six hours, they cause losses of 80 %. In contrast, studies [5, 6] are not able to predict ten minutes intermittencies, being this period of great interest because of the number of existing events.

4 Conclusions

The inherent variation of solar energy is the main challenge to maintain the quality of energy and the reliability of the photovoltaic generation. Hence the importance of knowing the magnitude and duration of the intermittences. The proposed methodology helps to quantify the number and power loss of these interruptions by demonstrating that the spline model fits clearly to the unstable behaviour of radiation.

Found expressions serve as a basis to make statistically reliable predictions. The exposed technique can be used with any set of weather stations information whether in microscale, local-scale or mesoscale through networks of stations. In addition, models maintain conservative conditions to obtain a monthly energy reserve, offsetting decreases caused by interruptions and achieving stable support systems with low ranges of uncertainty. The analysis performed, also leaves out a 10 % of contiguous intermittencies that could be powered by the mains. This study will be used to manage solar production with a turbine-pumping system to supply the demand profile on the CEDER.

5 Acknowledgments

We would like to thank the CEDER by providing information for the development of this work.

References

1. Abdollahi Sofla, M., Gharehpetian, G. B. Dynamic performance enhancement of microgrids by advanced sliding mode controller. Electrical Power and Energy Systems, vol. 33, no. 1, pp. 1-7 (2011).
2. Guerrero, J. M., Blaabjerg, F., Zhelev, T., Hemmes, K., Monmasson, E., Jemei, S., Comech, M. P., Granadino, R., Frau, J. I. Distributed generation: toward a new energy paradigm. IEEE Industrial Electronics Magazine, vol. 4, no. 1, pp. 52-64. (2010).
3. Mathiesen, B. V., Lunda, H., Karlsson, K. 100% Renewable energy systems, climate mitigation and economic growth. Applied Energy, vol. 88, no. 2, pp. 488-50. (2011).
4. Chowdhury, S., Chowdhury, S. P., Crossley, P.: Microgrids and active distribution networks. 1st edn. The Institution of Engineering and Technology, London (2009).
5. Lorenz, E., Heinemann, D., Wickramarathne, H., Beyer, H., Bofinger, S. Forecast of ensemble power production by grid-connected PV systems. Proc. 20th European PV Conference. (2007).
6. Perez, R., Kivalov, S., Renné, D., Schlemmer, J., Hemker, K., Hoff, T. Validation of short and medium term operational solar radiation forecasts in the US. Solar Energy, vol. 84, no. 12, pp. 2161-2172. (2010).
7. López-Meraz, R. A., Hernández-Callejo, L., Del Ángel-Ramos, J. A., Hernández-Cruz, Q. Relationship between environmental variables and the performance of solar radiation using the spline fit. Dyna Energía y Sostenibilidad. (2016).
8. Barrientos-Andrés, F., Olaya, J., González, V. Un modelo spline para el pronóstico de la demanda de energía eléctrica. Revista Colombiana de Estadística, vol. 30, no. 2, pp. 187-202. (2007).
9. Bedolla-Hernández J., Majewski-Szymiec T., Szwedowicz-Wasik D., Martínez-Rayón E., Cortés-García C., Gutierrez-Wings E. S. Aproximación de perfiles discretos en elementos de contacto de ensambles mecánicos. Ingeniería Investigación y Tecnología, vol. XIV, no. 1, pp. 99-111. ISSN: 1405-7743 FI-UNAM. (2013).
10. Toriz-Palacios, A., Sánchez-López A. Exploración integrada probabilística para robots móviles en ambientes complejos. Computación y Sistemas, vol. 18, no. 1, pp. 195-215. ISSN: 1405-5546. (2014).
11. Bowman A., Azzalini A. Applied smoothing techniques for data analysis: The kernel approach with s-plus illustrations. Oxford Statistical Science Series, 18. Oxford: Clarendon Press. p. 193. (1997).
12. Petrinovic, D. Causal Cubic Splines: Formulations, Interpolation Properties and Implementations. IEEE Transactions on Signal Procesing. vol. 56. pp. 5442-5453. Doi: 10.1109/TSP.2008.929133. (2008).
13. Couture S., Beal J. and Antar Y. The cubic spline interpolation of a standing wave envelope. Antennas and Propagation Society International Symposium. AP-S. Chicago, IL, USA. (1992).
14. Wolberg G. and Alfy I. Monotonic cubic spline interpolation. Computer Graphics International, Proceedings. Canmore, Alta Canada. (1999).
15. Mathews, J. H., Fink, K. D. Numerical Methods Using MATLAB. Third ed., Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ. (1999).
16. Grasselli, M., Pelinovsky, D. Numerical Mathematics. Jones & Bartlett Publishers, Inc., CA. (2008).
17. Reinsh, C. H. Smoothing by Spline Functions. Numerische Mathematik. vol.10. pp. 177-183. (1967).

18. Silverman, B. W. Some Aspects of the Spline Smoothing Approach to Non-Parametric Regression Curve Fitting. Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological) Vol. 47. pp. 1-52. (1985)
19. Härdle W. Applied nonparametric regression. Econometric Society Monographs. Cambridge, UK: Cambridge University Press. p. 333. (1992).
20. JMP 8.0.2. SAS Institute Inc. © 2009.
21. Jayadevan, V. T., Rodriguez, J. J., Lonij, V. P. A., Cronin, A. D. Forecasting solar power intermittency using ground-based cloud imaging. In World Renewable Energy Forum, including World Renewable Energy Congress XII and Colorado Renewable Energy Society Annual Conference, vol. 3. pp. 2100-2106. (2012).

Proposals to the Operation, Tertiary Control and Optimization of DC Microgrids

Jorge Mírez[1[0000-0002-5614-5853]], Luis Hernández-Callejo[2[0000-0002-8822-2948]], Manfred Horn[1], Gabriela Mendoza[1[0000-0002-3649-6365]] and Lilian J. Obregón[2]

[1] National University of Engineering, Lima, Peru
jmirez@uni.edu.pe, mhorn@uni.edu.pe, ga.mendoza.guerra@gmail.com
[2] University of Valladolid, Campus Universitario Duques de Soria, Soria (Spain)
luis.hernandez.callejo@uva.es, liliancitaobregon@gmail.com

Abstract. In the present work, proposals are presented to the operation, tertiary control and optimization of the Direct Current Microgrids (DC MG). The general objective is the performance of the own DC MG and of inter-connection between them and with a Utility Network (UN) under constant values of demand and supply during a short period of time. To this end, have been developed mathematical models that describe the operation of the MG components and the DC MG complete. The new MG operation forms has been implemented with their respective mathematical models, is too proposed optimization strategies based on the new operation forms proposed in this paper, the electrical interconnection between DC MGs is studied through mathematical models with the energy and power balances and proposed operation forms for DC MG. The mathematical models developed have been implemented in Matlab/Simulink software of MathWorks Inc. to perform the numerical simulations of the different study scenarios.

Keywords: Microgrid, Direct Current, Operation.

1 Introduction

Since the 70's, the world economy is heading towards a new period of more stable growth in the decades to come. Being this stage a phase characterized by the innovation of products in the existing industries and the creation of new industries in different basic sectors such as the energy sector. This indicates that the new technologies introduced in the energy sector during the last 20 years (wind turbines, gas turbines, fuel cells, ICT, etc.) will be massively integrated into the energy sector in the decades to come [1].

The electrical systems that have been implemented over the past 70 years supplying electric power from large power plants through power transformers to high-voltage interconnected networks, known as transmission networks. Each individual generation unit is large with a range of up to 1000 MW either supplied by hydro, nu-

clear or fossil fuels. The transmission network is used to transport the electrical energy, sometimes at considerable distances, and this power is then carried through several distribution transformers to the final circuits where the electric power is delivered to the end users [2].

A Smart Grid is an electricity network that uses digital technology and other advanced technologies to monitor and manage the transport of electricity from generation sources to meet the varying demand of electricity from end users. Smart Grids coordinate the needs and capabilities of all generators, network operators, end users and electric market stakeholders to operate all parts of the system as efficiently as possible, minimizing costs and impact to the environment while is maximizing the reliability, resilience and stability of the system. Smart Grids are an evolutionary set of technologies that will be deployed at different speeds in diverse environments around the world, depending on local commercial attractive, compatibility with existing technologies, regulatory developments and investment frameworks [3].

The fundamental concept of an MG can be assumed as follows: it is an integrated energy system consisting of distributed energy resources and multiple electric loads as a simple autonomous network, be it in parallel or isolated from the existing UN. MGs can be seen as the building blocks of Smart Grids or as an alternative path to hyper-intelligent networks "Super Grid" [4]. There are several ways to classify MGs. For the purpose of the present work, we will classify it according to the form of voltage of the MG-bus in: alternating current MGs (AC MG), direct current MGs (DC MG) and alternating / direct current MGs.

For other side, the cities shape the energy landscape; have more than half of the population of the entire planet and around 80% of world GDP (Gross National Product) in 2013, and cities account for around two thirds of the energy demand primary and 70% of total CO2 emissions related to energy. The energy and carbon footprint of urban areas will increase with urbanization and the growing economic activity of urban citizens. By the year 2050, the urban population will increase to include two thirds of the world's population and the urban share of world GDP will be around 85%. The continuation of the current trends of the energy system, driven by existing policies such as those of the 6DS, will increase the urban demand for primary energy by 70% - from the levels of 2013 - to about 620 EJ in the year 2050, the year that said demand it will represent 66% of the total. Likewise, carbon emissions derived from the use of energy in cities (including indirect emissions related to the generation of electricity and heat) would increase by 50%. Therefore, efforts to promote sustainable urban energy routes are crucial to achieving national and global low carbon ambitions [5]. This implies a great challenge in the work of research, development and innovation of technological solutions that allow achieving these goals, that is, of technologies whose implementation will have to have a greater growth in comparison to that of the population. In the future, massive implementations of microgrids in cities will are realized and this scenario is what we are assuming in the present.

Therefore, there is a concern to investigate and propose new forms of operation of DC MG and of interconnection between them and with the UN that lead us to provide contributions in the tertiary control, management and optimization of DC MG. Is assumed that there is an ideal communications system.

After this introduction, the document is as follows: section 2 presents the state of the art on MG, section 3 shows the proposals presented in this work and section 4 shows the conclusions of the work.

2 State of Art on MG.

2.1 About of MG's configuration

Karigano [6] has a configuration that consists mainly in that all the sources of generation, storage and the UN are connected to the same splice or bar, and; from this bar or splice, the DC bus starts and goes to another junction or bar where the electric loads are connected. For this configuration, a DC voltage balance control is essential, for which a voltage balancer is located near the rectifier to balance positive and negative voltages; it is also possible that the voltage balancer is located close to the loads. The voltage control during the connection and reconnection is carried out by means of a technique called "voltage clamp control" which during the disconnection process takes over control of the EDLC's DC/DC converter and during the reconnection process is given by the progressive step with the start of the rectifier and gradual increase of the reference voltage and cessation of the control assumed by the EDLC's DC/DC converter.

Similarly in [7], [8] and [9], all generation and storage sources with their respective DC/DC or AC/DC converters come together in a only DC bus from which it connects directly to electrical loads. Shadmand [10] shows a similar MG configuration and only adds a power electronics interface between the DC bus and the electrical loads.

Nikhil [11] presents a topology in which the MG is constituted by two blocks. The sources of generation in alternating current are joined in an AC-bus to which the AC loads are also connected. The DC-bus is connected via an AC/DC converter to the AC-bus. DC generation and storage sources and DC loads are connected to the DC-bus. Fan [12] shows a DC MG that has two DC-bus, in each of them both AC and DC loads are connected with their respective DC/DC and DC/AC converters, storage source by super-capacitors and DG sources, additionally, the UN converges in the PCC, the AC/DC converters that feed the MG DC-buses and a storage system for the entire MG. A centralized storage system called "Hybrid enery storage" feeds the entire DC MG in case if necessary and is connected to the PCC.

2.2 Voltages of the MG bus.

There is a variety of voltage values. Karigano [6] uses a DC bus formed by a three-pole system with voltages - 170 Vdc, + 170 Vdc and +340 Vdc. In [13], [14], [11] and [7], the DC bus works in 400 Vdc. Chen [15] reports that the bus nominal voltage is 100 Vdc; in [16] is 1200 Vdc; in [17] is 350 Vdc and has an extension of 1 km. Bokanga [18] and Enam [19] uses 12 Vdc. Li [20] uses a 380 Vdc DC bus.

Once the current from DC to AC has been transformed, the voltages presented to the electric loads are very varied. In [6] the voltages for the loads are 3φ 220 V, 1φ 100 V and 48 Vdc obtained with their respective converter; instead, in [17] there is a single DC/AC converter that delivers 200 V / 100 V 3φ. In [15] there are only DC loads connected directly to the bus (100 Vdc bus), as in [18] (12 Vdc bus) and [14] (400 Vdc bus). In [19] it gives the user the option to choose between being a DC load (12 Vdc bus) or uses a converter to have 240 V. In [11] AC loads are fed with 400 V and DC loads with 400 Vdc.

In the same way, the voltages of UN that are connected at the point of common coupling (PCC) with the MG are different. In [6] the transformer is 6.6 kV / 200 V 3φ, in [15] it is 415 V / 55 V 3φ, in [14] it is YY 380 V / 220 V, in [16] is 11 kV / 0.69 kV. In [11] the UN supplies in low voltage at 400 V.

2.3 Optimization of MG.

Dos Santos [21] uses Mixed Integer Linear Program (MILP) as part of a prediction process of operation for a day and in which they get the forecast error is indirectly reduced doing the optimization with the real data of the system every five minutes. MILP is also used by Dang [7] to perform a real-time optimization of the disconnection / restoration of electrical loads in a DC MG taking into account the demand, the priorities and the critical time of operation when the available energy of the MG is different from the energy demanded by the load, and; in [8] where based on a data forecast and using MILP, a predictive power flow is obtained which leads to an optimization strategy for power balance in real time.

Shadmand [10] uses an optimization technique based on a Multi-Objective Genetic Algorithm (MOGA) which uses isolated data with high temporal resolution and data ranges every 10 seconds instead of hourly data, something commonly used; this methodology uses a technical-economic criterion to determine the optimized design of the MG considering multiple criteria including size, costs and availability.

Meng [9] proposes a dynamic consensus algorithm based on a distributed optimization method that helps improve system efficiency given that offers high flexibility and expansibility when it is compared with the centralized control.

Li [20] mentions that the optimization problem is solved with a heuristic method for the economic dispatch to minimize total operating costs in DC MGs, in which an

operating cost is associated with each generator in MG, including the UN, combining the cost - efficiency of the system with the requirements of response to the demand of the UN, also, a model of power flow is included in the optimization problem, thus the transmission losses can be considered for the dispatch of the generation.

Is observed that the storage of energy is mainly centralized in a single equipment within the MG. Storage is not being used in each energy source that allows the continuous production of electricity by the sources and a constant value in the demand made by the electric loads for at least a certain duration of time, which would facilitate the optimization calculations and that in this paper is provided as a new way of MG optimization and operation.

3 Proposals.

3.1 Double nominal voltage of MG bus

The electrical wires that are used in low voltage are qualified to work up to 1000 V, therefore, there is a potential reserve of voltage that can be used. In practice, the same low voltage wires can be used in the 220 V, 380 V, 440 V and 660 V electrical circuits, just as it is done with the low voltage equipment (switches, fuses, contactors, relays, others).

By being able to increase the nominal voltage of the MG-bus, it would allow a greater power transmission capacity and / or the possibility of supplying to electrical loads much more distant or in the case of the hours of maximum demand be affected by the worsening of the quality of electrical energy due to excessive voltage drop.

The voltage drop along of the electrical line is evaluated assuming that the maximum voltage drop is 5% of the nominal voltage. If it is exceeded, it is changed to a higher nominal voltage; similarly, if the circulating current exceeds the nominal capacity of the wires, it is changed to a higher rated nominal voltage (ie, in both cases, the nominal voltage of the MG would change from VN1 to VN2). These decisions are taken by a control of excess current capacity and voltage drop (CECVD) which is shown in Fig. 1.

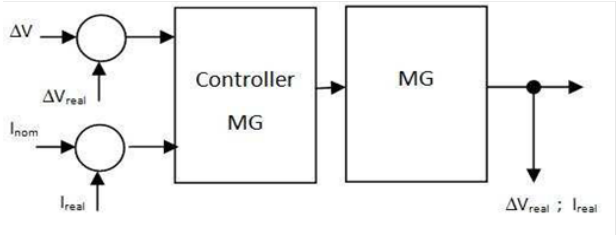


Fig. 1. Schematic diagram of the CECVD.

3.2 Sub-levels of nominal voltage and interconnection of MGs

A future scenario into of cities is that many MGs (universities, residential buildings, markets, schools, hospitals, industrial centers, etc.) will be connected to UNs (primary or secondary) and also will have to interact between them.

Two MGs: MG1 and MG2, have operating parameters that define their availability for interconnection. The voltage is one of them and it is an indispensable requirement, given that the difference will make possible the transfer of electrical energy. The other variable is the amount of energy to be transferred and with what intensity it can be done, for this purpose, we will propose that in the communication between the respective Central Controllers (CC) of MGs, a transfer agreement of a certain amount of power is established for a certain time (which amounts to a certain amount of energy) and we will call it "period or state". With this, both the microsources and storage of each MG ensures that during the following state of operation there is a certain amount of energy requested / received of constant value. This facilitates the purchase / sale / transfer of energy as well as the control and management of it, deriving towards the controllers of the microsources (CM) and storage (CS) the work of managing, predicting and optimizing locally the production and / or temporary storage of energy.

In this sense, what should be considered is a temporary storage in each microsource, PCC and electrical loads. The internal storage of the microsources would consist of a combination of batteries (or similar technology) and supercapacitors that allow both a rapid response and a base energy storage; in the same way in the electric loads (although the size of the storage would be of smaller capacity in comparison to microsources). In contrast, in the PCC there would be a storage that feeds from the UN under a dual scheme of base storage and rapid response. Ideally no storage source would have been connected to the MG-bus; however, it is assumed that there is at least one storage source to the MG-bus.

Given this, has been considered that the order of priority for the energy supply of each DC MG is: (a) Self-supply from its own (generation and/or storage) microsources. Under this condition it is not physically connected to the other DC MG or to UN; (b) Feed from the other DC MG and stay disconnected of UN, and; (c) Feed from UN and disconnect from the neighboring DC MG.

Therefore, the power manager is prioritized as: (a) renewable energies are prioritized to dispatch their electric power to the MG; (b) in the case of deficit, stored energy is injected into the MG-bus; and (c) in the case of lack of power from the microsources and storage, the MG is fed by the entrance of electrical energy from the UN through the PCC (see Fig. 2).

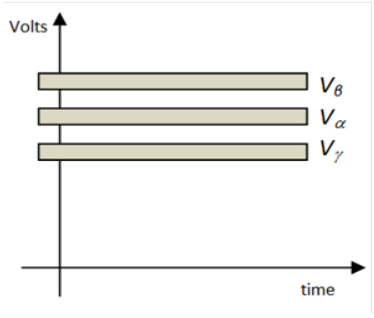


Fig. 2. Graphical representation of the possible voltage levels in each MG.

Both MG1 and MG2 have a V1 and V2 DC-bus respectively. If they are physically connected, the following conditions are met: If V1 > V2, the electrical energy flows from MG1 to MG2; if V2 > V1 then the electrical energy flows from MG2 to MG1 (see Fig. 3)

The interconnection simulations have been implemented on 100 states and each state with a duration of 5 minutes, which makes an equivalent to 500 minutes (8 hours 20 minutes). The Fig. 4 shows the powers that are transferred through the interconnection between MG1 and MG2 and is appreciated that there are states in which no energy transfer is performed, that is, they do not meet the two basic conditions for transferring electrical energy. The colors in Fig. 4 represent the direction of the power flow. In Fig. 5 the excess and deficit of both MGs can be appreciated. The surplus of each of them after having attended the demand of the neighboring MG is injected towards the UN. The deficit shown in both MGs is an indicator of the entrance of electricity from the UN since the neighboring MG cannot supply this deficiency and also displays states in which there is no deficit or surplus because the requirements for interconnection are not met. Fig. 6 shows the evolution of the energy balance between MG1 - MG2, MG1 - UN and MG2 - UN. For this analysis, the power that is transferred from MG1 to MG2 and negative value in the opposite direction has been considered as a positive value. In addition, is positive the value of the power that is transferred from any MG to the UN and negative the power that enters from the UN to the MGs. In general is observed that the interaction of MGs with the UN is based on importing energy, while between MGs it is a flow of compensated power. Fig. 6 is an indicator of deficit of installed capacity of microsources in each MG.

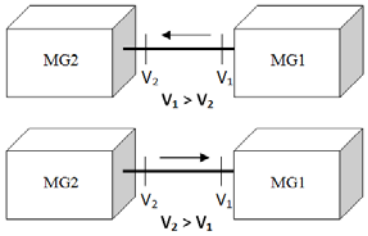


Fig. 3. Voltage conditions for the transfer of electrical energy between MGs.

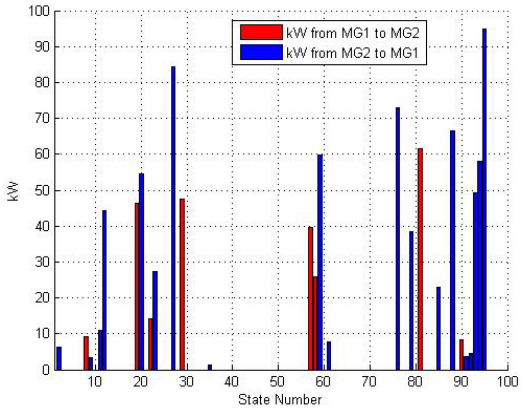


Fig. 4. Transfer of electrical power between two MGs.

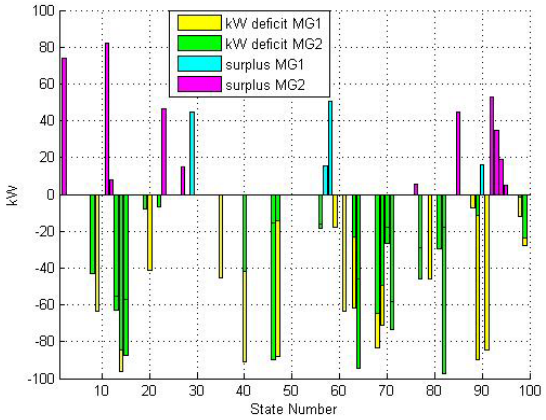


Fig. 5. Surplus and deficit of two MG interconnected

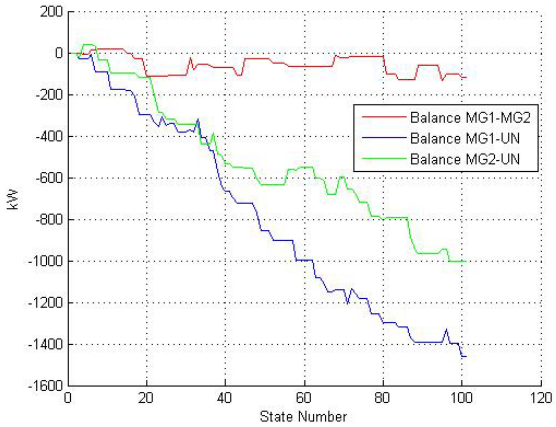


Fig. 6. Balance of the electric energy transferred between MGs and between MGs and UN.

3.3 Optimization.

Both the resource wind, sun and demand have a random behavior, therefore, if we propose the hypothesis of temporary storage both in generation and in demand, this standardizes the dispatch well now the sources can define (for a certain period of time) the power they can supply regardless of the variation of their prime resource, that is, the benefit is that from the MG-bus it would be seen as a microsource that delivers a constant power during a given period of time. In the same way the electric loads program their constant demand during a period of time and therefore the UN would have the necessary information from all the components of the MG for its programming in the following period. In the case of microsources such as wind turbines and PV, since they have more power to generate than they need to distribute, this excess can be temporarily stored within the same microsource and would serve to compensate for some internal power deficit that is present within the period of operation (or following periods), but in both cases the microsource provides a constant power value to the MG.

To elaborate the MG optimization model, we have started from the model written in [22], where a linear program is specified as follows: Minimize $f^T x$ under the conditions of $Ax \leq b$; $A_{eq}x = b_{eq}$ and $l_b \leq x \leq u_b$. Assume that the restrictions are grouped according to the inequality constraints, equality constraints and the limits of the decision variables. The first set of constraints: $Ax \leq b$ represents inequality constraints. The second set of constraints $A_{eq}x = b_{eq}$ represents the equality constraints, and $l_b \leq x \leq u_b$ represents the upper and lower limits of the decision variables. So A, A_{eq} are matrices and b, b_{eq}, l_b y u_b are vectors. f is a vector that represents the cost coefficient of the objective function with which the value of *x* is calculated and *fval* is the value of the minimum cost. Therefore, *x* is the power distribution by energy source.

The CC every 5 minutes (state duration) monitors the system and decides the energy purchase/sale for the next state. The simulation time is approx. 8 hours, divided into equal parts of hours before and after solar noon; with which we will have all the sources in generation capacity. Therefore, for a certain chronological time there are "m" states. In addition, has been considered that the MG needs "n" cost coefficients of the objective function for each state "m" and additionally, each state has energy to supply b_{eq}. So, have the following expression that represents the optimization process over time:

$$\begin{array}{cccccccc} \text{State} & f & & & & & b_{eq} \\ 1 & f_{1_{(1)}} & f_{2_{(1)}} & f_{3_{(1)}} & \cdots & f_{n_{(1)}} & b_{eq_{(1)}} \\ & \vdots & & & & & \vdots \\ \vdots & & & & & & \\ m & f_{1_{(m)}} & f_{2_{(m)}} & f_{3_{(m)}} & \cdots & f_{n_{(m)}} & b_{eq_{(m)}} \end{array}$$

where, A, A_{eq} are defined by the characteristics of the problem itself, in this case, they would show relationships between several sources of generation and storage, as well as the UN and would be contained within the optimized software, which after the data processing of *x* y *f* returns the values of *x* according to the following scheme:

$$\begin{array}{cccccccc} \textbf{State} & x & & & & & f_{val} \\ 1 & x_{1_{(1)}} & x_{2_{(1)}} & x_{3_{(1)}} & \cdots & x_{n_{(1)}} & f_{val_{(1)}} \\ & & & \vdots & & & \vdots \\ \vdots & & & & & & \\ m & x_{1_{(m)}} & x_{2_{(m)}} & x_{3_{(m)}} & \cdots & x_{n_{(m)}} & f_{val_{(4)}} \end{array}$$

Fig. 7 shows a result for 100 states (of 5 minutes duration in each state) equivalent to 8.333 hours of ordinary time and the evolution of the energy supply from the different sources including the UN is shown in Fig. 8. The prices assumed according to the energy source are: PV plant is 0.10 ± 0.2 US$/kW-h, of the wind turbines is 0.15 ± 0.2 US$/kW-h, battery storage is 0.20 ± 0.2 US$/kW-h and the UN is 0.25 ± 0.2 US$/kW-h (positive value prices are what is paid to the energy source for its energy produced and prices of negative value is what the source pays to buy energy in order to arrange it in your internal storage system). It is assumed that electric charges have an electrical demand of about 200 ± 80 × rand() kW, where rand() is a function of Matlab/Simulink software that allows to create a uniformly random value distributed

between 0 and 1 for each state, therefore, it creates random value evenly distributed between 120 and 280 kW; the power supplied by each microsource is 70 × rand() kW for each state (different random numbers for each microsource have been generated) and the capacity of supply from the utility network (UN) is 300 kW for each state.

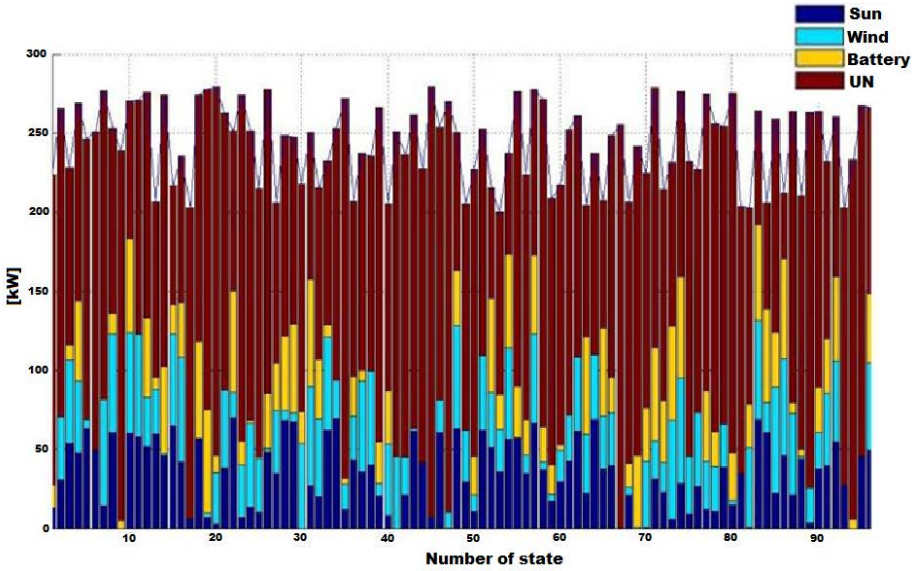


Fig. 7. Distribution of demand among energy sources.

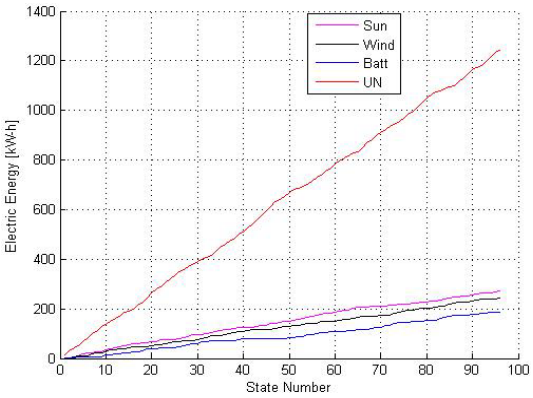


Fig. 8. Example of evolution of the energy supply from each microsource (where: Sun = PV plant, Wind = wind turbines, Batt = energy storage, UN = utility network).

4 Conclusions.

a. In this paper is proposed to tertiary control, management and optimization of DC MG, for example, that the central storage pass as storage of microsources, loads and PCC, which leads to a new form of operation based on a certain supply and demand value constant during a certain duration (called "period" or "state") that seeks to cushion the unpredictable behavior of demand such as the environmental variables that condition the offert.
b. A strategy for optimizing the distribution of electric energy from energy sources is proposed based on its price for each state. This allows that the operation of MG to be planned for the next state based on the information reported by the microsources, loads and PCC.
c. Is proposed to implement a voltage strategy within of the tolerance of the MG-bus nominal voltage, which consists in having different sub-voltages of specific work for the microsources, storage and UN with the purpose of order to prioritize the dispatch in said order of priority
d. Additional, is proposed as other voltage strategy that the MGs have two nominal voltages of the DC-bus which allows expanding the capacities and scope of the electric circuits with the same installed conductors. A control system has been conceptually developed to decide the change of DC-bus nominal voltage according to the voltage drop and the overcurrent. This will allow in the following investigations to develop and propose new forms of interconnection between microgrids.
e. For the interconnection, a control strategy has been developed based on the exchange of information between MGs to interconnect. This control helps the optimization and management of available resources throughout the whole that is analyzed. The management of the interconnection between MGs is carried out through an information interconnection by means of the transmission of signals using the electrical wires and a backup through a wireless connection.
f. The main considerations in this paper are for the implementation of MGs in the current electrical system and that the users do not modify their consumption characteristics, that includes, they can be supplied with the usual voltages of electric system of each country.

Acknowledgements

The authors thank the CYTED Thematic Network “CIUDADES INTELIGENTES TOTALMENTE INTEGRALES, EFICIENTES Y SOSTENIBLES (CITIES)” Nº 518RT0558.

References

1. Riso National Laboratoty for Sustainable Energy. “Riso Energy Report 4 – The Future Energy System – Distributed Production and Use”. Technical University of Denmark. 2005.
2. Janaka Ekanayake [et al]. “Smart Grid: Technology and Applications”. Jhon Wiley & Sons, Ltd. West Sussex, UK. 2012.
3. International Energy Agency. “Technology Roadmap: Smart Grids”. IEA Publications http://www.iea.org. Paris, 2011.
4. Peter Asmus, Adam Cornelius, Clint Wheelock. “Microgrids: Islanded Power Grids and Distributed Generation for Community, Commercial and Institutional Applications”. Research Report. Pike Research LLC. 2009.
5. International Energy Agency. “Energy Technology Perspectives 2016: Towards Sustainable Urban Energy Systems”. IEA Publications http://www.iea.org. Paris May 2016.
6. Hiroaki Karigano, Yushi Miura, Toshifumi. “Low-Voltage Bipolar-Type DC Microgrid for Super High Quality Distribution”. IEEE Transactions on Power Electronics. Vol. 25, No. 12, December 2010.
7. Tran Dang Khoa, Leonardo Trigueiro Dos Santos, Manuela Sechilariu, Fabrice Locment. “Load Shedding and Restoration Real-Time Optimization for DC Microgrid Power Balancing”. 2016 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON).
8. Manuela Sechilariu, Baochoa Wang, Fabrice Locment. “Power Management and Optimization for Isolated DC Microgrid”. 2014 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion.
9. Lexuan Meng, Tomislav Dragicevic, Josep M. Guerrero, et al “Dynamic Consensus Algorithm Based Distributed Global Efficiency Optimization of a Droop Controlled DC Microgrid”. ENERGYCON 2014, Dubrovnik, Croatia.
10. Mohammad B Shadmand, Robert S. Balog. “Multi-Objetive Optimization and Design of Photovoltaic-Wind Hybrid System for Community Smart DC Microgrid”. IEEE Transactions on Smart Grid. Vol. 5, Issue 5, Sept. 2014.
11. Leena Nikhil Suranglikar, S. N. Chaphekar. "Coordination Control of Microgrid". International Journal of Research in Engineering and Applied Sciences. Vol. 92, Issue 01, Jan 2014. pp: 9-14.
12. Wenchao Fan, Zaijun Wu, Xiaobo Dou et at "Design of a Microgrid with Low-Voltage Ride-Through Capability and Simulation Experiment". Journal of Applied Mathematics, Vol.2014, Art. ID 324527. http://dx.doi.org/10.1155/2014/324527
13. S. Glover, J Neel, A Lentine et al. “Secure Scalable Microgrid Test Bed at Sandia National Laboratories”. Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Control and Intelligent Systems. Bangkok. 2012.
14. Ji-Heon Lee, Hyun-Jun Kim, Byung-Moon Han, Yu-Seok Jeong, Hyo-Sik Yang and Han-Ju Cha "DC Micro-Grid Operational Analysis with a Detailed Simulation Model for Distributed Generation" Journal of Power Electronics, Vol. 11, No. 3, May 2011.
15. Dong Chen, Lie Xu. “DC Microgrid with Variable Generations and Energy Storage” in IET Conference on Renewable Power Generation 2011(RPG 2011). Sept 6-8, 2011.
16. Lie Xu, Dong Chen. “Control and Operation of a DC Microgrid With Variable Generation and Energy Storage”. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 26, No. 4, October 2011.
17. Naoki Ayai, Toshiya Hisaya, Toshikazu Shibata et at. "DC Micro Grid System". SEI Tecnical Review. Number 75. Oct 2012. pp:132-136.

18. Gilbert M Bokanga, Atanda Raji, Mohammed TE Kahn, "Design of a low voltage DC microgrid system for rural electrification in South Africa". Journal of Energy in Southern Africa, vol 25, no. 2, pp. 9-12. May 2014.
19. Syed Enam Reza, Mou Mahmood, A.S. M Kaikobad et al "A Novel Load Distribution Technique of DC Microgrid Scheme on PV-Diesel Hybrid System for Remote Areas of Bangladesh". International Journal of Scientific & Technology Research. Volume 2, Issue 1, January 2013.
20. Cendan Li, Federico de Bosio, Fang Chen, et al. "Economic Dispatch for Operating Cost Minimization under Real Time Pricing in Droop Controller DC Microgrid". IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics. Vol. PP, Issue: 99 DOI: 10.1109/JESTPE.2016.2634026.
21. Leonardo Trigueiro Dos Santos, Manuela Sechilariu, Fabrice Locment. "Prediction-based Economic Dispatch and Online Optimization for Grid-Connected DC Microgrid". 2016 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON).
22. Roy H. Kwon. "Introduction to Linear Optimization and Extensions with MATLAB". Boca Raton, FL: CRC Press, 2014.

Study of the Influence of DC-DC Optimizers on PV-Energy Generation

Luis Hernández-Callejo[1[0000-0002-8822-2948]], Sara Gallardo-Saavedra[1[0000-0002-2834-5591]], Alejandro Diez-Cercadillo[1] and Víctor Alonso-Gómez[1[000-0001-5107-4892]]

[1] University of Valladolid, Campus Universitario Duques de Soria, Soria (Spain):
luis.hernandez.callejo@uva.es; L.H-C
s.gallardosaavedra@gmail.com; S.G-S.
alejandro.diez.cercadillo@gmail.com: A.D-C.
victor.alonso.gomez@uva.es: V.A-G.

Abstract. The integration of renewable generation sources in cities is a reality. Specifically, photovoltaic technology is the most used (facades, roofs, urban spaces, etc.). The existence of buildings at different altitudes and other urban obstacles can cause shadows in the photovoltaic modules. These shadows will cause the decrease of photovoltaic efficiency. Therefore, the increase in photovoltaic efficiency is essential. This increase in efficiency can be achieved by associating DC-DC converters (DC-DC Optimizers) with photovoltaic modules. This work presents real results of the increase of efficiency of the photovoltaic modules, from the effect of the DC-DC Optimizers. In addition, the work shows simulations of the shadow effect on photovoltaic modules.

Keywords: Photovoltaic Efficiency, DC-DC Optimizers.

1 Introduction

Smart City (*SC*) has emerged to solve the problems of population growth and urbanization [1]. However, this new concept of city must make changes to enable this evolution. The reality indicates that cities are evolving, for example in [2], 15 UK cities are analyzed, and the results are that carbon dioxide emissions do not grow/decrease linearly.

SC must adapt its existing infrastructures. A critical infrastructure is the electricity grid, as shown in [3]. In addition, as shown [4], the rapid increase in population and population flows require a complete modernization of existing infrastructures (electricity, water, gas, etc.).

Buildings are one of the most important infrastructures in the city. These buildings, like the city, must evolve, and they must integrate renewable sources and improve their energy efficiency [5]. This new building concept, called *Smart Building* (*SB*), will be responsible for increasing the efficiency and sustainability of the *SC*, since it will integrate renewable sources and other good practices [6-8].

As already mentioned, *SC* aims to improve efficiency at all levels. This increase in efficiency may affect the advanced programming of *SB* behavior [9]. Energy efficiency

also refers to the sending of information through the *SC* [10-11]. Another important aspect of energy efficiency has to do with the reduction of peak demand and energy savings, as presented [12] through its new algorithm.

As presented in [13], the integration of large-scale renewable sources in cities is a reality. But this integration must be done in an efficient way, as mentioned in [14], and this efficient way refers to the way to install and improve the production of energy. Integration can be understood in a massive but small-scale way, as presented by the authors in [15], where small-scale integration is with photovoltaic (PV) and solar.

In this sense, the increase in efficiency in renewable systems is critical, as they reflect in [16-17]. Therefore, this work is focused on demonstrating the increase of efficiency in the photovoltaic systems integrated in *SC*, since these renewable plants will be subject to numerous shadows (solids, obstacles, etc.). The use of optimizers at the photovoltaic module level will increase the efficiency of the overall system. The authors have developed several shadow scenarios, which have been validated with simulations and with a real environment. The rest of the document is as follows: section 2 presents a theoretical review, section 3 explains the methodology used, section 4 shows the results, section 5 discusses the results and section 6 presents the conclusions of the work.

2 Theoretical review

The performance of PV modules is inevitably decreased due to the different working conditions of each of the panels. The PV system output power will be reduced as a consequence of mismatch effects and environmental factors caused by partial shading, soiling, dirtiness, mismatch between PV cells generated during their manufacture or ageing mismatching, differences in the orientations and inclinations of solar surfaces, differences in temperature or irradiance in the modules. A lot of the available energy would be wasted since the shaded PV cells would be acting as passive charges and they would limit the output current of the unshaded ones [18]. These effects lead to the weakest PV cells determining the output power of the whole string of modules. Therefore, additional potential benefits of distributed power electronics include increased design flexibility by allowing mismatched or longer strings of PV panels, improved monitoring, and increased system availability [19].

In order to avoid this, DC-DC converters on PV module level can be added. These devices, commonly known as power optimizers, are mounted in each single module and minimise the impact that the different factors have on the performance of PV systems. Additionally, it allows testing the behaviour of each module by means of communications included into the electronic device, facilitating the operation and maintenance of PV arrays [20]. This is really beneficial in the cases of big PV plants, in which there are a large number of PV modules connected, because it helps to identify whether a PV module is working well. In case of absence of optimizers, it would be possible to identify the array in which is located the failure, but it would be more difficult to detect the single module or modules which fail. A quick detection of failures would avoid energy losses due to faults on the PV system.

Another appropriate application for this technology is the case of *Building Integrated Photovoltaic* (*BIPV*) systems, in which the environmental factors can be very significant in contrast with open-space plants. While a large PV plant is designed with the single aim of optimizing energy production, the goal of a *BIPV* system is not only electricity generation but also the achievement of aesthetical and functional objectives from an architectonic point of view [18]. The optimal orientation and inclination of BIPV systems are practically impossible, as well as avoiding partial shadows. Furthermore, having all the modules tested in *BIPV* systems is an enormous advantage, because in this case the access to PV panels can be very complex and it will incur heavy maintenance costs.

As a result of shadows or other failures, the P-V curve shows two *Maximum Power Points Tracking* (*MPPT*) values, one global and one local [20]. *MPPT* controllers find and maintain operation at the *MPP* using an *MPPT* algorithm. The modular converters incorporate this function. The literature proposed many of these algorithms. For instance, some MPPT methods such as fractional open circuit voltage and fractional short circuit current are simple to implement with moderate level of accuracy. The commonly used perturb & observe (P&O) technique produces oscillation around the maximum power point with a possibility of failure under partial shading condition. Other appliances employ PV power forecasting models to compute the reference value of the maximum PV power to be tracked by a direct power control scheme which of composed of a SEPIC converter [21].

The investigations through this topic started at the end of the 20th century [22]. First of all, in 1992, it was studied the incorporation of DC-AC converters in each module. In this way, each module will have a small inverter and the grid connection of the PV modules will be carried out directly in AC current, so the mismatch and environmental factors will not affect from one module to the rest of them. Some authors affirm that the peak efficiency of the system is 89% and that they have a lifetime of approximately ten years [23]. Nonetheless, it has some important disadvantages which inspire the study of alternative solutions. Firstly, it is quite difficult to reach efficiently and reliably the grid voltage from the output power of a module. Moreover, the use of several micro-inverters implies the duplication of protections and AC filters to offer the same quality and safety than a central inverter, which leads to a more expensive solution. Different micro-inverter efficiency are analysed in [24], in which a test circuit that can be used as efficient measure to analyze and compare different features of micro inverters is designed.

The necessity of micro AC inverters to boost the DC voltage and invert it leads to a lower efficiency and higher cost than DC-DC converters. Therefore, the implementation of DC-DC converters has been the main alternative studied during the last decade. During the first years of the 21th century the first application of this concept were proposed. In 2004, a cascaded DC-DC converter connection of PV modules was proposed [25]. It offers the advantages of modular converters approach without the cost or efficiency drawbacks of individual DC-AC grid connected inverters. Later experimental results show an efficiency of approximately 95 % [26]. Nevertheless, the performance of converters depends on the operating conditions of the PV system along with the performance characteristics of the converter [19]. There are many different topologies

which vary according to the complexity of circuits, stress on used components and quality of input and output power. Generally, a single-inductor, single-switch boost converter topology and its variations exhibit a satisfactory performance in the majority of applications where the output voltage is greater than the input voltage. The performance of the boost converter can be improved by implementing a boost converter with multiple switches and/or multiple boost inductors. The two inductor boost converter exhibits benefits in high power applications high input current is split between two inductors, thus reducing power loss in both copper windings and primary switches. Furthermore, by applying an interleaving control strategy, the input current ripple can be reduced [27]. More recent developments carried out point to newer DC-DC technologies with low cost and high reliability. In the delta-conversion concept [28], the converters are only active when differences between substring and module output powers occur. This reduces the operation time and thereby increases the reliability.

3 Method

Experiments have been performed in the PV laboratory of the Campus Duques de Soria, University of Valladolid. This PV field is composed by two strings of eight Isofoton I-159 modules, with the same mechanical configuration and orientation. The main characteristics of the modules used in the tests are showed in Table 1.

Table 1. Isofoton I-159 module main characteristics.

	Main features
Pmax	159 Wp
Voc	21.6 V
Vmmp	17.4 V
Isc	9.81 A
Impp	9.14 A
Toll	+/- 5%
ΔIsc	5.4 mA/ºC
ΔUoc	-80 mV/ºC

The first string is directly connected to a string inverter, SB 1.5-1VL40, which main characteristics are showed in Table 2.

Table 2. SB 1.5-1VL40 main characteristics.

	Main features
V_{DC} max	600 V
V_{DC} MPP	160-500V
I_{DC} max	10 A
I_{SC} pv	18A
V_{AC} ,r	230
P_{AC} ,r	1500W
Smax	1500 VA
F_{AC} ,r	50 Hz

I_{AC} ,max	7A

On the other hand, the second string has optimizers TIGO TS4-O installed in each module, which characteristics are reviewed in Table 3. The eight optimizers are connected in series to a second inverter identical to the first string inverter (Table 2).

Table 3. TIGO TS4-O main characteristics.

	Main features
Rated DC Input Power	475W
Max Input Voltage @ Lowest Temperature	90V
Isc	12A
Max Voc @STC	75V
Min Vmp @STC	16V

Six different tests have been studied to determine the influence of DC-DC optimizers in the production in case of shading. Different diagrams of the six shadings configurations are further analyzed in the results section.

1. One module affected, the shaded part will be 80% of three cells of the same circuit, leaving the rest of the module in standard conditions.
2. One module shaded in each string, affecting 50% of the surface of nine cells.
3. One module shaded in each string with 100% of the surface of thirty six cells belonging to the same circuit.
4. Four modules of the string affected. In each module a line of 12 cells, belonging the same circuit, is shaded at 50% of its surface.
5. Whole string shaded in the same percentage as test 4, 12 cells in each module shaded at 50% of its surface.
6. One module affected, covering 80% of nine cells in the same column, affecting all three circuits.

As an example, Fig. 1 shows the shading configuration in test number 1 and Fig. 2 the shading configuration in test number 4.

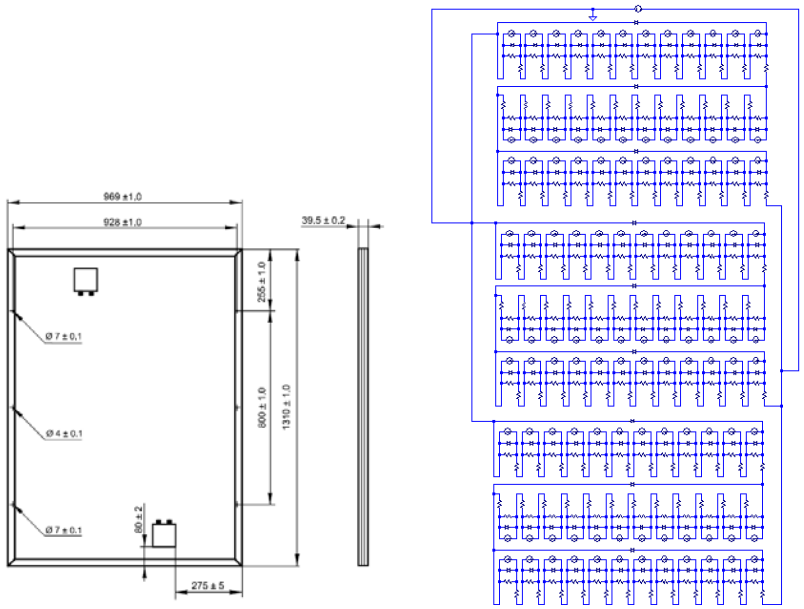


Fig.1 Shading configuration studied in case 1.



Fig.2: Shading configuration studied in case 4.

All shading configurations have been simulated in LTSpice using the methodology proposed in reference [20], in order to obtain the theoretical IV curves to make possible the evaluation. Additionally, the real IV curves of the strings for each shading configuration have been experimentally obtained using the HT SOLAR IV-400 TRACER. The dimensions of the module used are presented in Fig. 3.a and the electrical structure of the module simulated in LTSpice in Fig. 3.b.



(a) (b)

Fig.3: Isofoton I-159 modules dimensions (a) and electrical structure of the module simulated in LTSpice (b).

Finally, all the results downloaded from the string inverters and the optimizers have been analyzed and compared considering the resultant theoretical and experimental IV

curves of each shading configuration, and are presented in the results and discussion sections.

4 Results and discussion

In this section we explain the two types of experiments that have been carried out. Firstly, computer simulations with LT Spice software and secondly field simulations in the PV laboratory of the Campus Duques de Soria (University of Valladolid) are displayed. Additionally, the results of the IV curve experimental tests in the field are shown and compared with LTSpice simulations.

4.1 LT Spice experiments

LTSpice is a SPICE simulation freeware for analog circuits endowed with schematic capture and a wave form viewer. This software has been used to simulate the IV curves for each shading test proposed, which are presented in this section.

Benchmark. In benchmark simulation there is no shaded cells in order to see clearly the ideal graphics of both power and current, as showed in Fig. 4. Power curve has a maximum point at 1223.8W.

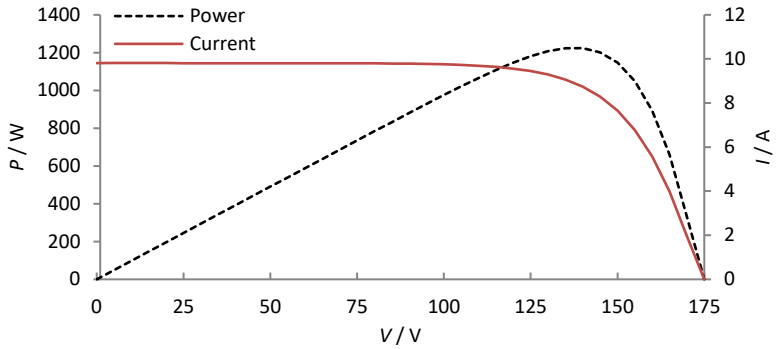
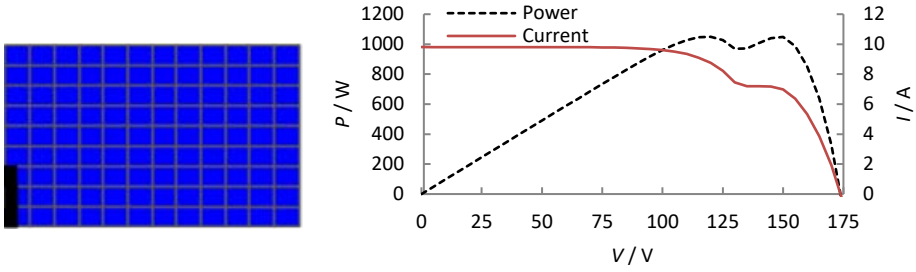


Fig.4: Benchmark graphics.

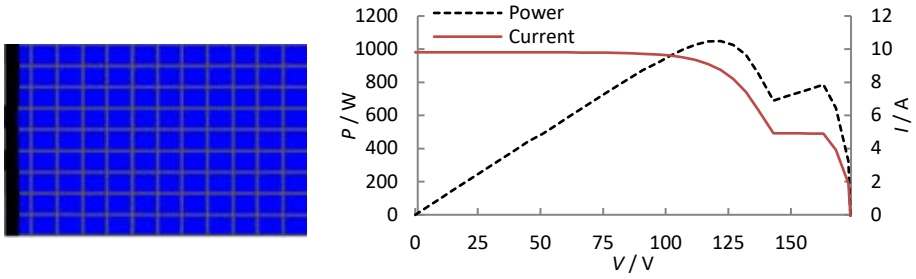
Test 1. With only one module affected, the shaded part will be 80% of three cells of the same circuit, leaving the rest of the module in standard conditions (Fig. 5.a). In this simulation two *MPP* appear clearly (Fig. 5.b) with similar values of 1048.5 W and 1049.2 W.



(a) (b)

Fig. 5. Test 1 shaded module (a) and IV and power curve (b).

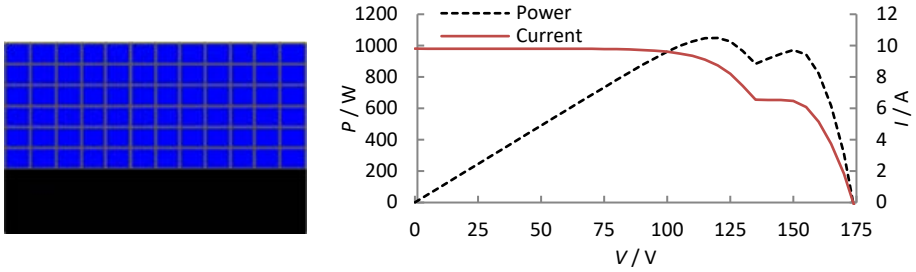
Test 2. It continues having only one module shaded in each string, affecting 50% of the surface of nine cells (Fig. 6.a) belonging to three different circuits. Fig. 6.b shows how the power curve is affected by this new type of shadow, resulting in two *MPP* with values of 1048.5 W and 784.9 W.



(a) (b)

Fig. 6. Model of test 2 module (a), and test 2 graphics (b).

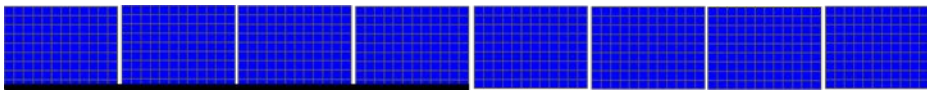
Test 3. Only one module shaded, one circuit 100% affected (36 cells belonging to same circuit, Fig 7.a). In Fig 7.b first MPP in 1048.9 W remains equal as test 2 but the second MPP rises up to 972 W.



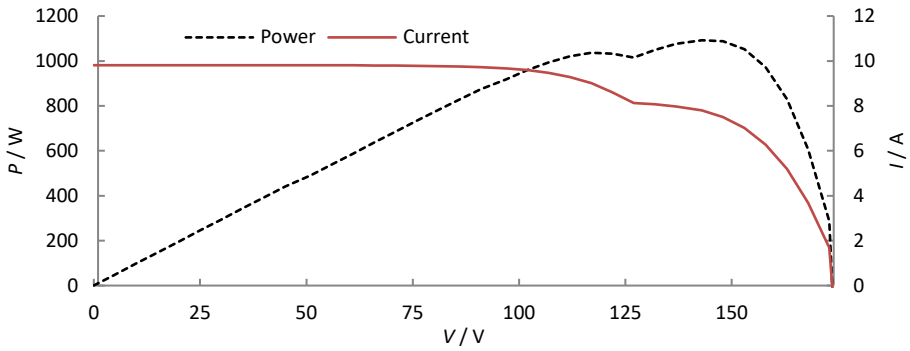
(a) (b)

Fig. 7. Shaded test 3 solar module (a) and its simulation graphic (b).

Test 4. First one affecting 4 modules. In each module a line of 12 cells, belonging the same circuit, is shaded at 50% of its surface (Fig. 8.a). In Fig. 8.b, power graph exhibits two *MPP* at 1035.8 W and 1092 W.



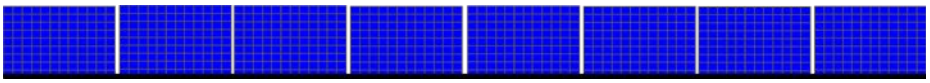
(a)



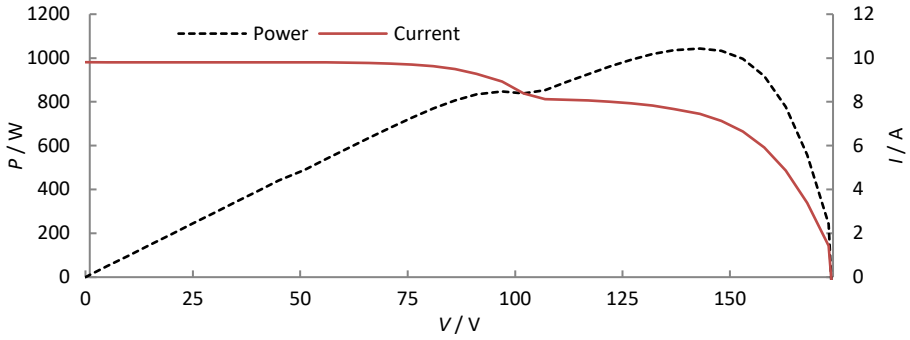
(b)

Fig. 8. Full test 4 string with half of its modules shaded (a) and graphics of test 4 (b).

Test 5. Continuing with the shadows of test 4, test 5 has the whole string shaded in the same way as the previous test, 12 cells in each module shaded at 50% (Fig. 9.a). This power curve graph lowers the first *MPP* to 838.5 W but maintains the maximum in 1033.1 W (Fig. 9.b).



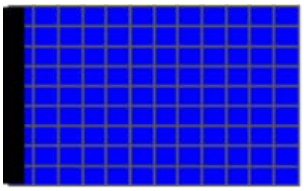
(a)



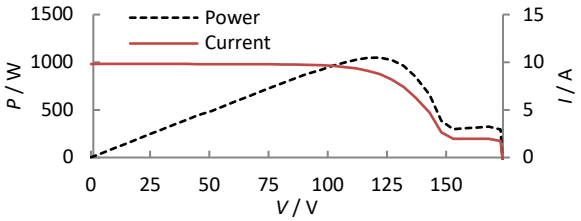
(b)

Fig. 9. Full test 5 string (a), and power and current curves of test 5 (b).

Test 6. Last test concerns only to one module covering 80% of nine cells, affecting all three circuits (Fig. 10.a). Although tests 2 and 6 are similar, the shading difference of 30% causes the lowest *MPP* to fall to 306.5 W, with the high remaining at 1048W (Fig. 10.b).



(a)



(b)

Fig. 10. Shaded module (a) and test 6 curves (b).

4.2 Laboratory experiments

Tests were realized from May to June, with duration of one week for each, shadow position was changed every Monday. The day in which the shadows are changed is not counted in the tests, so there are six full days for each one.

Atypical weather (strong storms, cloudy and windy days) in certain days of tests 3, 4 and 6 generated graphics full of maximums and minimums instead of the standard production graph. Production data is monitored by each inverter, one mark every 5 minutes.

In order to simplify nomenclature, strings are numbered “String 1” and “String 2”. String 1 worked with optimizers and String 2 worked without them.

There are natural shadows affecting both Strings in late afternoon and first evening hours.

Benchmark. Five days of benchmark data with similar production graphics in sunny days (Fig.11) and disparate production charts on cloudy days (Fig.12), left two recognizable patterns common to all days: string 2 starts sooner than string 1 and string 1 produces more than string 2 in the first hours of the morning. In cloudy days, string 1 has more difficulty reaching some of the production peaks after the cloud leaves (Fig.12).

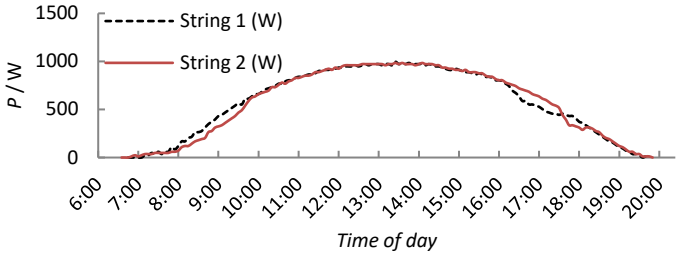


Fig. 11. Benchmark production graph on sunny day.

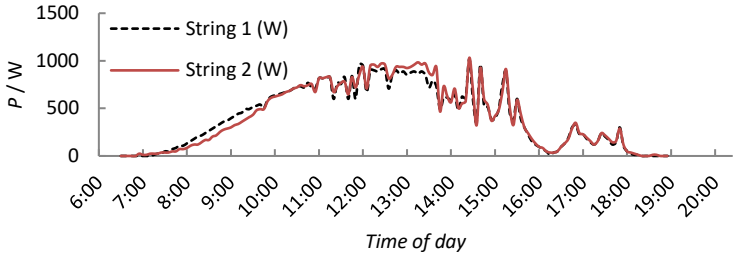


Fig.12. Benchmark graphics in a cloudy day.

Test 1. Same shadow pattern as simulations with LTspice, one module shaded with 80% of three cells of the same circuit, leaving the rest of the string in standard conditions (Fig. 5.a).

One cloudy and windy week collecting data show results like Fig. 13, full of maximums and minimums. Still there is the same pattern: String 1 starts later but rises first in early hours of the day.

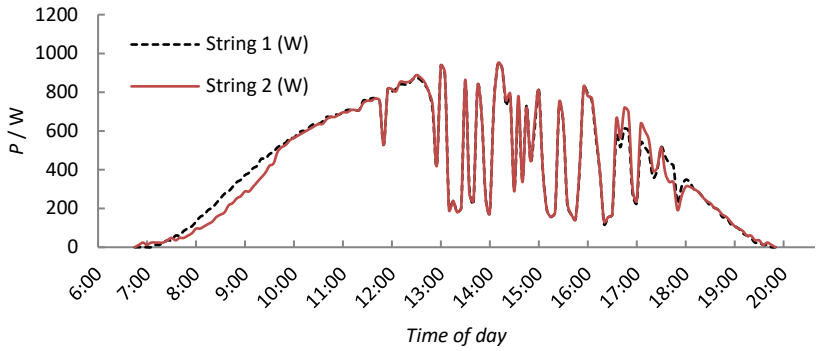


Fig.13. Test 1 graphics, cloudy and windy days.

Test 2. One module shaded in each string, affecting 50% of the surface of nine cells as showed in Fig. 6.a. This week string 1 had strange graphics that we attribute to some technical error or a bad configuration of the inverter. (Fig. 14).

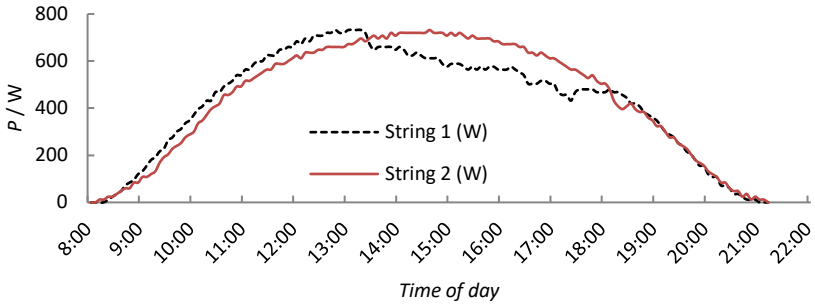


Fig 14. Test 2 graphic. Note the rare behavior of String 1

Test 3. One module shaded in each string with 100% of the surface of thirty six cells belonging to the same circuit. This was another atypical stormy week with late afternoon heavy rain periods. Fig. 15 displays String 2 higher production on cloudy periods before the storm.

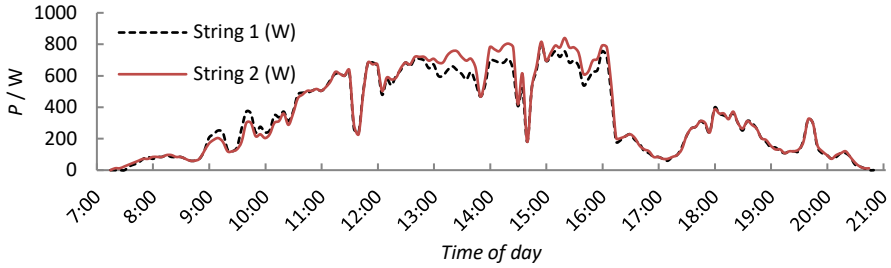


Fig. 15. Test 3 graphics.

Test 4. This week only 4 of 8 modules where affected with one line of 12 cells belonging to the same circuit, shaded at 50% of its surface (Fig.8.a). Another stormy week full of moments of sun left production peaks and long intervals below 400 W, as seen on Fig. 16.

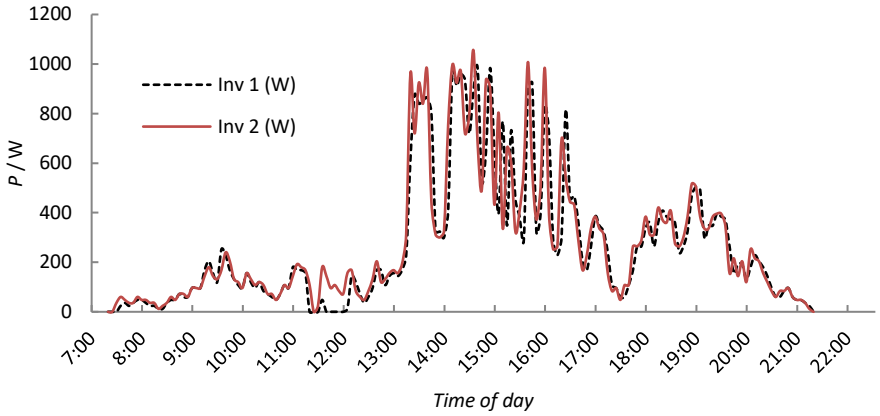


Fig. 16. Cloudy day on test 4 week.

Test 5. This test has the whole string affected, 12 cells in each module shaded at 50% (Fig. 9.a). Graphics are very similar from string 1 to string 2 with only one common pattern: string 2 starts first but string 1 produces more in the first hours of the day (Fig. 17).

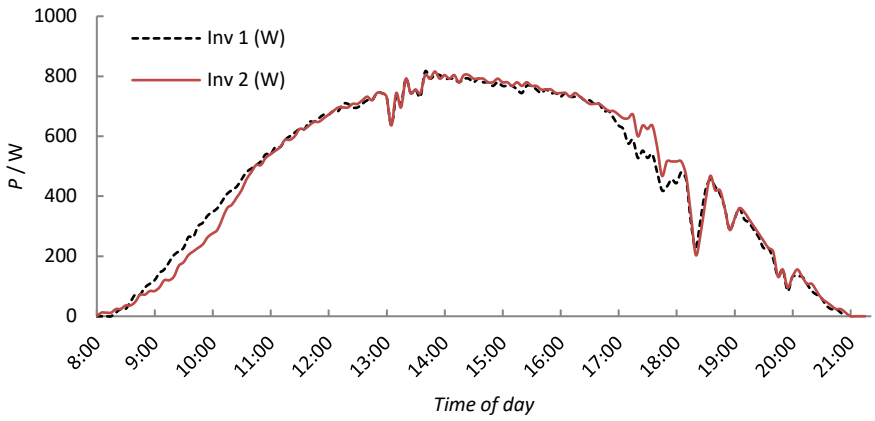


Fig. 17. Sunny day graph on test 5 week.

Test 6. With a similar pattern of test 2, test 6 has strong differences between the production of the two Strings which increases its value considering that it was a rainy week. Fig. 18 shows a typical rainy day on Test 6 week.

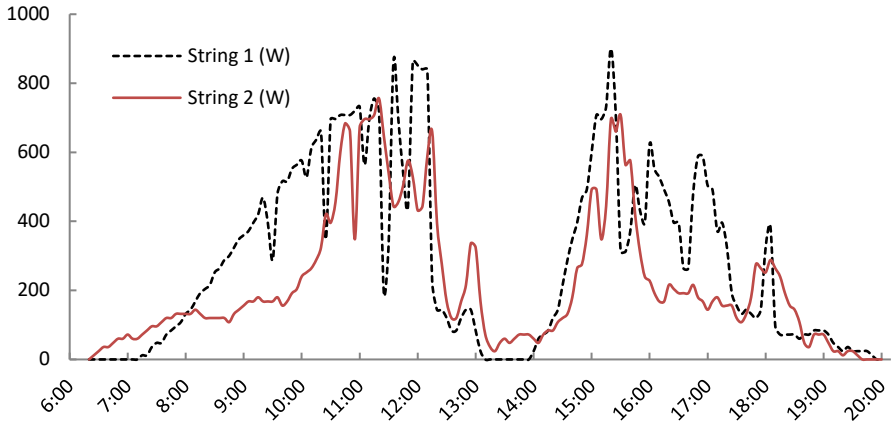


Fig.18. Test 6 rainy day graph.

The optimal conditions to have being able to evaluate all the tests between them with larger amounts of data would have required more time with appropriated weather conditions. However, the comparison of the data has been made between the two strings of each test separately and although the meteorological conditions were not the most suitable, available data of the two strings of each test can be compared without any issue, as they have been taken in equal conditions.

On almost every test day, the graphs showed that the power delivered by String 1 is greater than the supply by String 2, even though some tests were carried out with adverse weather, stormy and rainy weeks, etc.

In the first few minutes of the day, the String 2 starts its production before but then the optimizers generate an acceleration to the power delivered by the String 1 in the early hours of the day when the sun is still far from its zenith leaving a positive count clearly in favor of optimized String.

Additionally to the analysis of the production introduced, it has been performed the real IV curves of the strings for each shading configuration using the HT SOLAR IV-400 TRACER. Some of these results are presented in this section.

Fig. 19 shows the IV curve of Test 4 configuration which is really similar to Fig. 5.b: Both have one lower MPP and then one higher MPP. The big difference between them is the first MPP: Simulation points it at1035.8 W but the real measure sets it at 700W. This is caused by the degradation of its components.

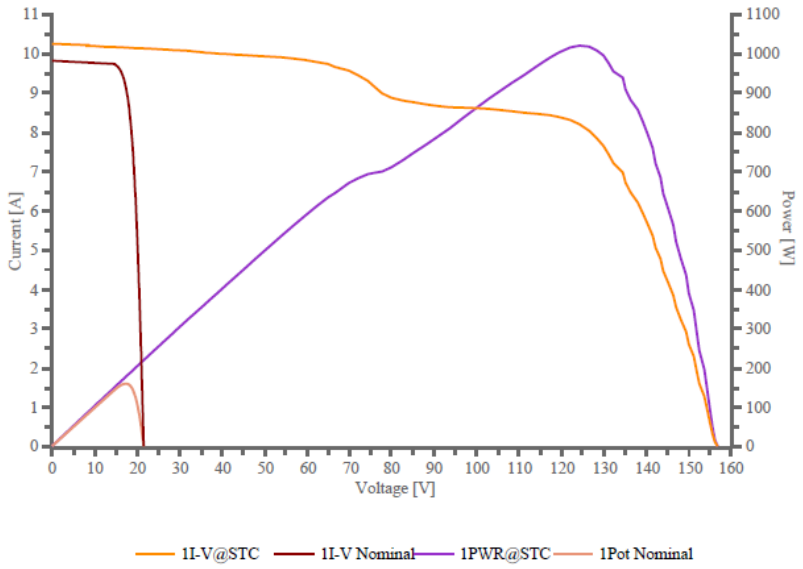


Fig.19. IV Curve of test 4 shadow configuration.

Another example of the panel degradation can be seen in the Fig. 20. Corresponding to Test 5, can be contrasted with Fig. 9.b. First MPP on simulation was at 838.5 W but due to material decay the PV curve, first MPP in real conditions is at just 350 W.

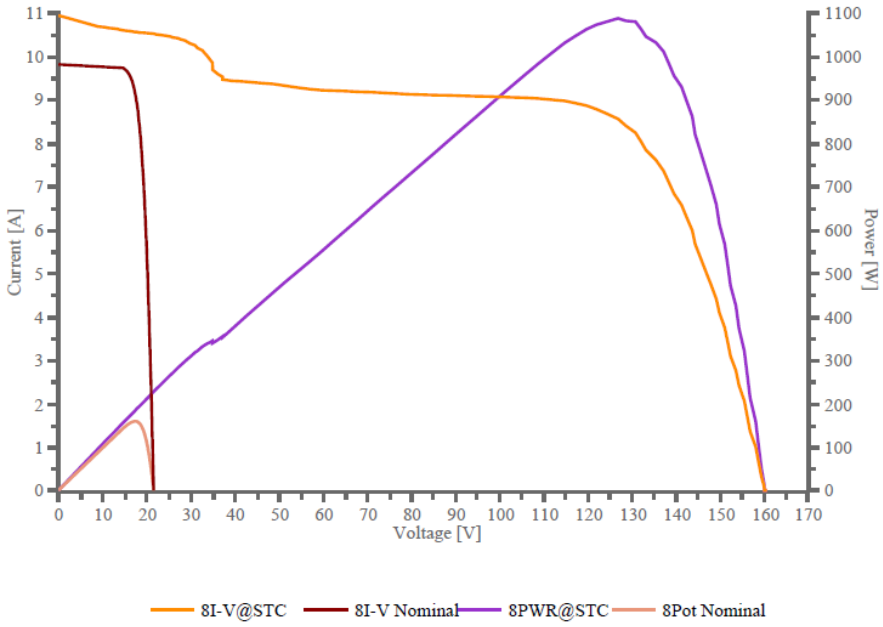


Fig. 20. Test 5 shadow configuration IV Curve.

5 Conclusions

The integration of renewable energy sources is a key aspect, and the city is an integrating space for renewable technologies. Specifically, photovoltaic technology is the most promising of all, since its integration in buildings and public spaces is simple.

In this sense, the increase in efficiency of the deployed technology is fundamental. In case of photovoltaics, the presence of shadows can cause the performance drop of energy delivery. Intelligent devices such as those presented in this work (DC-DC optimizer) can make photovoltaic technology better in production.

This research shows how the String of photovoltaic modules equipped with DC-DC optimizers delivers a higher power in most of the tests carried out, despite the absence of optimal weather conditions. The results must be taken into account in those locations where there are shadows, which may affect the photovoltaic modules. Finally, it is proposed as an interesting future work performing a comparison of the efficiency with a string of modules equipped with micro inverters.

Acknowledgment

The authors thank the CYTED Thematic Network “CIUDADES INTELIGENTES TOTALMENTE INTEGRALES, EFICIENTES Y SOSTENIBLES (CITIES)” nº 518RT0558.

References

1. Silva, B.N., Khan, M., Han, K.: Towards sustainable smart cities: A review of trend, architectures, components, and open challenges in smart cities. Sustainable Cities and Society 38(April), 697-713 (2018).
2. Yigitcanlar, T., Kamruzzaman, Md.: Does smart city policy lead to sustainability of cities? Land Use Policy 73(April), 49-58 (2018).
3. Anderson, A., Loomba, P., Orajaka, I., Numfor, J., Saha, S., Janko, S., Johnson, N., Podmore, R., Larsen, R.: Empowering Smart Communities: Electrification, Education, and Sustainable Entrepreneurship in IEEE Smart Village Iniciatives. IEEE Electrification Magazine 5(2), 6-16 (2017).
4. Kumar, H., Kumar, M., Gupta, M.P., Madaan, J.: Moving towards smart cities: Solutions that lead to Smart City Transformation Framework. Technological Forecasting and Social Change Available online 30 April 2018.
5. García-Fuentes, M.A., González, I., Gordaliza, A., de Torre, C.: Retrofitting of a Residential District under Near Zero Energy Buildings Criteria. Proceedings 1(7), 686-691 (2017).
6. Pooranian, Z., Abawajy, J.H., Vinod, P., Conti, M.: Scheduling Distributed Energy Resource Operation and daily Power Consumption for a Smart Building to Optimize Economic and Environmental Parameters. Energies 11(6), 1348-1365 (2018).
7. Marinakis, V., Doukas, H.: An Advanced IoT-based System for Intelligent Energy Management in Buildings. Sensors 18(2), 610-626 (2018).
8. Moseley, Ph.: EU Support for Innovation and Market Uptake in Smart Buildings under the Horizon 2020 Framework Programme. Buildings 7(4), 105-129 (2017).
9. Wei, T., Zhu, Q., Yu, N.: Proactive Demand Participation of Smart Buildings in Smart Grid. IEEE Transactions on Computers 65(5), 1392-1406 (2016).
10. Jiang, D., Zhang, P., Lv, Z., Song, H.: Energy-Efficiency Multi-Constraint Routing Algorithm With Load Balancing for Smart City Applications. IEEE Internet of Things Journal 3(6), 1437-1447 (2016).
11. Li, Z., Shahidehpour, M.: Deployment of cybersecurity for managing traffic efficiency and safety in smart cities. The Electricity Journal 30(4), 52-61 (2017).
12. Mahapatra, Ch., Kumar, A., Leung, V.C.M.: Energy Management in Smart Cities Based on Internet of Things: Peak Demand Reduction and Energy Savings. Sensors 17(12), 2012-2833 (2017).
13. Strzalka, A., Alam, N., Duminil, E., Coors, V., Eicker, U.: Large scale integration of photovoltaics in cities. Applied Energy 93(May), 413-421 (2012).
14. Harsha, P., Dahleh, M.: Optimal Management and Sizing of Energy Storage Under Dynamic Pricing for the Efficient Integration of Renewable Energy. IEEE Transactions on Power Systems 30(3), 1164-1181 (2015).
15. Kaygusuz, A., Keles, C., Baykant, B., Karabiber, A.: Renewable energy integration for smart cities. Energy and Buildings 64(September), 456-462 (2013).
16. Gallardo-Saavedra, S., Hernández-Callejo, L., Duque-Perez, O.: Technological review of the instrumentation used in aerial thermographic inspection of photovoltaic plants. Renewable and Sustainable Energy Reviews 93 (October), 566-579 (2018).
17. Gallardo-Saavedra, S., Hernández-Callejo, L., Duque-Perez, O.: Image Resolution Influence in Aerial Thermographic Inspections of Photovoltaic Plants. IEEE Transactions on Industrial Informatics (14 August online), 1-9 (2018). doi: 10.1109/TII.2018.2865403
18. Alonso, R., Román, E., Sanz, A., Martínez, V.E., Ibañez, P.: Analysis of Inverter-Voltage Influence on Distributed MPPT Architecture Performance. IEEE Transactions on Industrial Electronics 59(10), 3900-3907 (2012).

19. Deline, C., MacAlpine, S.: Use Conditions and Efficiency Measurements of DC Power Optimizers for Photovoltaic Systems. In: IEEE ENERGY CONVERSION CONGRESS AND EXPOSITION (ECCE), Denver, CO (US), 2013.
20. Gallardo-Saavedra, S., Karlsson, B.: Simulation, validation and analysis of shading effects on a PV system. Solar Energy 170 (August), 828-839 (2018).
21. Azab, M.: DC Power Optimizer for PV Modules Using SEPIC Converter. In the 5th IEEE International Conference on Smart Energy Grid Engineering, Oshawa, ON, Canada, 74-78, 2017.
22. Orduz, R., Solórzano, J., Egido, M.A., Román, E.: Analytical study and evaluation results of power optimizers for distributed power conditioning in photovoltaic arrays. Progress in Photovoltaics: Research and Applications 2013(21), 359-373 (2013).
23. Rodriguez, C., Amaratunga, G.A.J.: Long-Lifetime Power Inverter for Photovoltaic AC Modules. IEEE Transactions on Industrial Electronics 55(7), 2593-2601 (2008).
24. Sadati, A.M., Krauter, S., Bendfeld, J.: Comparison of Micro Inverters Based on Practical Analysis. In: 5th International Youth Conference on Energy (IYCE), Pisa, 2015, 1-6.
25. Walker, G.R., Sernia, P.C.: Cascaded DC–DC Converter Connection of Photovoltaic Modules. IEEE Transactions on Power Electronics 19(4), 1130-1139 (2004).
26. Román, E., Alonso, R., Ibañez, P., Elorduizapatarietxe, S., Goitia, D.: Intelligent PV Module for Grid-Connected PV Systems. IEEE Transactions on Industrial Electronics 53(4), 1066-1073 (2006).
27. Elkamouny, K., Lakssir, B., Hamedoun, M., Benyoussef, A., Mahmoudi, H.: Simulation, design and test of an efficient power optimizer using DC-DC interleaved isolated boost PV-micro inverter application. In: International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD), Marrakech, Morocco, 2017, 518-525.
28. Bergveld, H.J., Buthker, D., Castello, C., Doorn, T., de Jong, A., van Otten, R.,. de Waal, K.: Module-Level DC/DC Conversion for Photovoltaic Systems: The Delta-Conversion Concept. IEEE Transactions on Power Electronics 28(4), 2005-2013 (2013).

Smart Campus Human Tracking: the Case of University of Málaga

Jamal Toutouh, Javier Luque, and Enrique Alba

Departamento de Lenguajes y Ciencias de la Computación,
Universidad de Málaga, Málaga, Spain
jamal@lcc.uma.es, javierluque@uma.es,eat@lcc.uma.es

Abstract. Smart city initiatives have emerged to mitigate the negative effects of a very fast growth of urban areas. A number of universities are applying smart city solutions to face similar challenges in their campuses. In this study, we analyze the possibility of using low cost sensors based on detecting wireless signals of light commodity devices to track the movement of the members of the university community. This tracking information will help the university managers to provide the users with smart services. The first insight is that there were not detected barely movements through the campus during late-night/early morning hours (from 0:00H to 6:00H). In turn, the number of human flows sensed in a given direction is similar to the ones in the opposite one. The analysis of the sensed data has shown that the most mobility occurs during the opening and finishing school hours, as expected. Finally, we observed that the sensors are able to detect vehicular mobility.

Keywords: Smart city · Smart campus · Human tracking

1 Introduction

The concept of smart city has emerged to reduce the negative effects of a very fast growth in urban areas. With this purpose, countless new applications are appearing to improve our daily life [3, 13, 14, 20, 22]: parking, optimized routes, car charing, smart systems in buses, private models of mobility, signaling, lane decisions, social implications of mobility, energy consumption, etc. Most of these new applications use intelligent systems able to detect, predict, and efficiently manage different aspects of the city.

Most of these systems require accurate and up-to-date information based on actual data, such as, the origin/destination (OD) matrices of the city, pedestrian behavior or the number of cars per street. The access to these data is an issue today. Thus, there are some initiatives to advance in the knowledge of the city to build a minimum set of open data services to allow stakeholders to used them for final services. Traditional measurement systems [8] use to be expensive, traumatic to install, and scarcely available has been replaced with new technologies like sensors, cameras, etc. [6, 21, 24].

Smart solutions to be developed for our cities can be directly applied on the university campuses. The main reason is that universities and their campuses can be seen as urban areas with a reduced scale, but they have to face similar challenges than the city managers [27]. There are several initiatives aiming at applying intelligent systems to provide advanced services to the university community members, e.g., *Smart Campus of UMA*[1], *Smart Campus-Unicamp*[2] of Unicamp in Sao Paulo (Brasil), *DTU-Smart Campus*[3] of Technical University of Denmark, and *UIJ-Smart Campus*[4] of Universitat Jaume I in Castellón (Spain). These smart campus services range from a smart classrooms, which benefits the teaching process within a classroom, to an intelligent campus that provides lots of proactive services in a campus-wide environment [27].

In this context, we focus on the analysis of the spatio-temporal behavior of the people through the Campus of Teatinos of the University of Málaga (UMA). We used the data captured by a cyber-physical system based on a wireless sensor network (WSN) installed along the campus. This system was devised in the context of Smart Campus Project of UMA [21]. These sensors are able to detect the Bluetooth and Wi-Fi wireless signals of the devices carried by the people and extract the hardware MAC (Media Access Control) addresses to identify them individually. This low cost alternative is experiencing a fast development, since it is very cheap and easy to maintain [15].

The main goal of this study is to perform an analysis of the data captured by the sensors installed in the campus in order to evaluate people movement. The extracted knowledge would be very interesting for the university managers since they would know how many people are in the different areas of the campus depending on the time and how they move. This knowledge could be used to design and to assess the services provided according to the influx of the people, to take decisions about the schedules to avoid overcrowding, etc.

In the next section, we summarize a set of different studies that deal with human tracking. Section 3 describes the experiments carried out. Section 4 presents the experimental results and their main findings. Finally, conclusions and future work are considered in Section 5.

2 Related Work

During the last decades, collecting data about the spatio-temporal behavior (movement) of individuals has got the attention of academia and industry, since it provides useful information to be used in a number of domains, such as, crowd management, safety management or consumer research [26].

Traditionally, the human tracking studies were performed by the application of some slow and inefficient methods such as shadowing [12], collecting travel diaries [2], and surveys [9]. All these methods require the direct interaction between

[1] https://www.uma.es/smart-campus/
[2] http://smartcampus.prefeitura.unicamp.br/
[3] http://www.smartcampus.dtu.dk/
[4] http://smart.uji.es/

humans to get the required data. This methodology was improved by applying more technologically advanced methods, such as light curtains [11], which is very limited due to the impossibility to identify individually each person to develop human paths, to calculate the duration of the movement or to get more complex information about the behavior of the people. The advances in image processing methods facilitated the emergence of video tracking methods based on image and behavior recognition [18].

Nowadays, a number of applications and services are based on the user identification by using Radio Frequency Identification (RFID) technologies taking the advance of the common use of smart cards, smart wearables, and other type of smart devices equipped with such technology [4]. Besides, Global Positioning System (GPS) based approaches are also applied to track and to analyze the movement of people [19]

Finally, a set of new proposals are based on identifying people by getting wireless signals of the Bluetooth and the Wi-Fi interfaces of the devices carried by the humans. This is a very promising approach because most of smartphones are equipped with both type of network interfaces. Individual identification is carried out by registering the unique MAC address of the devices. Thus, different authors have applied such idea in various domanis and settings: to measure throughput time in airport security, on a large scale open air festival, on a trade fair, in an office setting, and to study the movements of tourists in a city amongst others [15].

When using Bluetooth to track individuals, Bluetooth scanners are being installed at locations of interest. These scanners continuously scan for Bluetooth signals emitted by the devices and register every detection. The method is based on the *proximity principle*. Thus, it is assumed that the device is located close to the scanner. In practice, the scanners register in the log when a device is detected (i.e., they store the scanner id, the time stamp, and the MAC address). The path can then be reconstructed by combining the logs of all scanners, where the location of each scanner is added as the location of the device.

The main issue when using Bluetooth is that the interface has to be in *mode on* to be scanned, so only a ratio of the population can be tracked. Various works showed that the detection ratio ranges between 7% and 11% [5, 24, 23].

Tracking by detecting Wi-Fi signals is very similar to the same by using Bluetooth. Thus, different researches have analyzed this technology since it critically improves the detection ratio [1]. The detection of Wi-Fi has been applied in tracking people in large outdoor areas [17], managing human queues [25], tracking humans in indoor environments [16], detecting pedestrian flows in different contexts as in metro areas [7], etc.

In the present study, we evaluated the applicability of Wi-Fi tracking to evaluate the spatio-temporal behavior of the members of the university community. Thus, we analyzed the data captured by the sensors installed in the context of Smart Campus of UMA.

3 Experimental Design

To carry out this work, we used a WSN installed in the university campus. The system is composed by a set of sensors connected to a central server that receives the captured data [21]. These sensors principally measure the environmental noise at the streets and detect humans by sensing the wireless devices carried by them. The data captured by this system were satisfactory used in a study about the environmental noise in the campus of UMA [10].

In order to detect humans, the sensors apply a procedure to extract MAC addresses from wireless signals sniffed by using their specialized wireless interfaces. As the MAC addresses are unique, they allow us to identify individually each device or human. The MAC addresses are stored together with a time stamp that indicates the moment when the device was detected. Thus, in this work, we used such a data to detect human flows.

In this work, we analyzed the data of two sensors: *Sensor 1* and *Sensor 2*. The first sensor is located in the facade of the School of Science and the *Sensor 2* in the facade of the School of Humanities. Both schools are located at the Boulevard Louis Pasteur, the main street that crosses the campus. The distance between the two analyzed sensors is 183 meters. Fig. 1 shows the location of both sensors. The used data cover the months of May and June of 2018 (from May 13, 2018 to June 30, 2018), so in the study we used the data of 61 days.

Thus, we analyzed the human movement (flows) through the university campus. With this purpose, we performed a first study about the number of devices/humans detected by each sensor. Second, we extracted and analyzed the flows of people who move through both sensors. As we have two sensors, we studied two different flows (see Fig. 1) *Flow A*, which considers the devices moving from *Sensor 1* to *Sensor 2* (i.e., from left to right), and *Flow B*, which takes into account the devices moving in the opposite direction (i.e., from right to left).

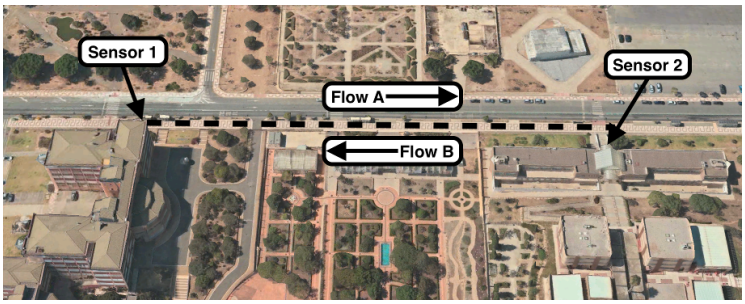


Fig. 1. Sensors location.

4 Results and Analysis

This section presents the main results and analyses. First, we study the devices (humans) detected by each sensor individually in order to evaluate the variability in the number of people that pass through the sensing points during the day. Then, we analyze different spatio-temporal aspects of the detected human flows by using the sensed data.

In this study, a given movement from the sensor s_i to the sensor s_j is detected when a given device (MAC address) is registered in s_i in a time t_{si}, and after a time Δt, the same device is detected in s_j, i.e., $t_{sj} = t_{si} + \Delta t$.

4.1 Human/devices detection

In order to evaluate the number of devices detected over time by the two sensors, we group the results each ten minutes. Thus, Figs. 2 and 3 shows this sensed data for the *Sensor 1* and the *Sensor 2*, respectively.

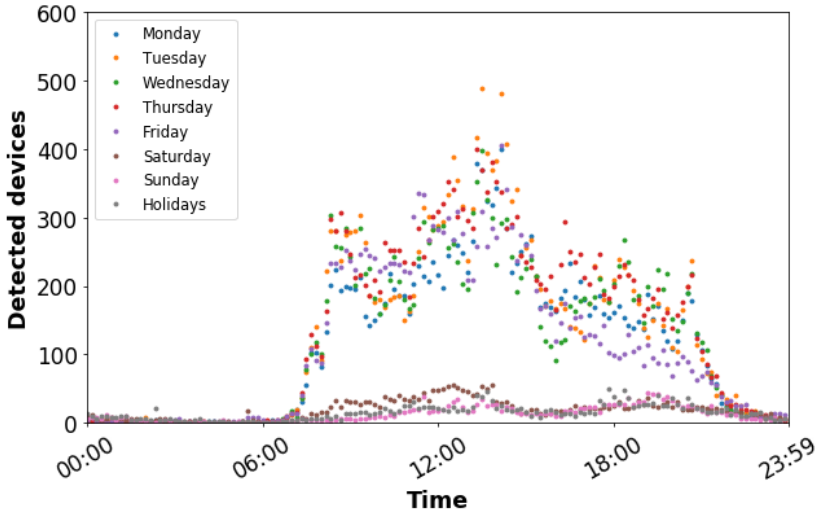


Fig. 2. Number of devices detected by *Sensor 1* over the day grouped by the week day.

For both sensors, the number of sensed devices is significantly low from midnight to 7:00H. This is principally due to the location of the sensors. They are installed along the Boulevard Louis Pasteur, which is a street basically used by the university community to move through the campus. Thus, this street is marginally crossed during late night/early morning hours.

Considering the data patterns from 7:00H, when the number of detected devices increases dramatically, we can observe two main groups of data: *working days*, which includes the data from Monday to Friday, and *no working days*,

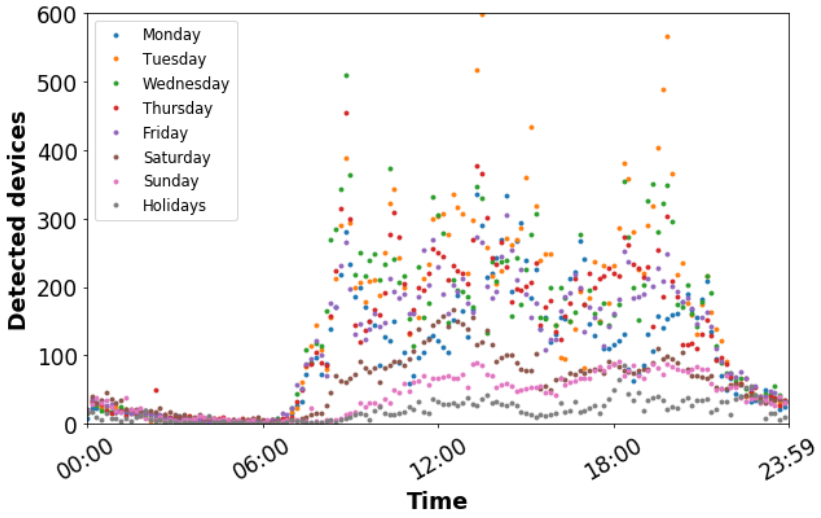


Fig. 3. Number of devices detected by *Sensor 2* over the day grouped by the week day.

which includes the data of the Saturdays, the Sundays, and the holidays. These patterns are much more clear in the results of the *Sensor 1* (see Fig. 2).

Table 1 summarizes the detection results by presenting the mean and the coefficient of variation of the detected devices each ten minutes for each data group. These results show that *Sensor 1* detects more devices than *Sensor 2* during *working days*. This is mainly because *Sensor 1* is located closer to the side walk than *Sensor 2*. In turn, this longer distance from side walk provokes that *Sensor 2* presents more difficulties to detect the devices carried by humans, generating very scattered results (see Fig. 3) with higher coefficient of variation.

In contrast, during *no working days*, *Sensor 2* sensed more devices than *Sensor 1*. This is principally due to a surface parking that is located close to the School of Humanities, which is used during the whole week to park the cars. Therefore, even during weekends there are a number of people crossing through this sensor.

Table 1. Mean and coefficient of variation results of the detected devices each ten minutes grouped by *working days* and *no working days*. *All data* represents the results without any group.

Patter type	***Sensor 1***	***Sensor 2***
	Mean±CV	**Mean±CV**
Working days	112.084±126.66%	100.929±130.69%
No working days	15.098±121.74%	45.823±116.40%
All data	78.462±158.97%	82.214±140.24%

As in this study we are interested in the evaluation of human spatio-temporal behavior through the university campus, we analyzed the flows generated during *working days* since these days critically represent most of the existent movement in this geographical area.

4.2 Flows detection

We evaluated two different types of flows: *Flow A*, movement from *Sensor 1* to *Sensor 2*, and *Flow B*, which considers the movement in the opposite way. Figs. 4 and 5 show two bar diagrams that represent the mean number of flows detected each half hour over the day for *Flow A* and *Flow B*, respectively.

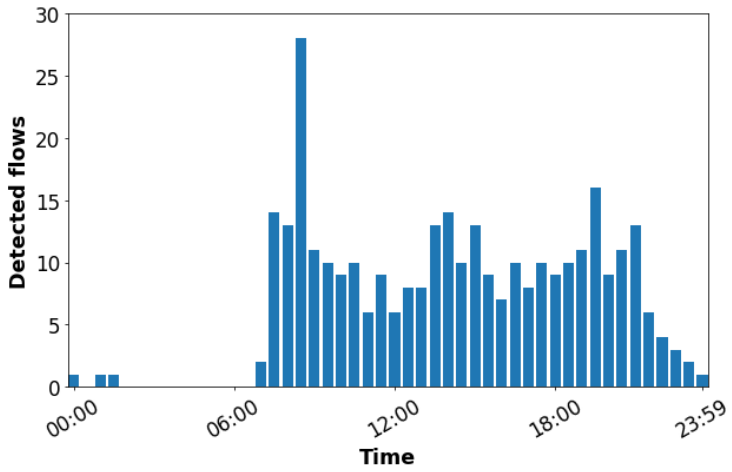


Fig. 4. Mean number of detected *Flow A* flows over the day for *working days*.

As it is shown in the figures, the distribution of the results of both types of flows are similar. In average, there were detected 244.92 movements per day from *Sensor 2* to *Sensor 1* (*Flow B*) and 229.112 *Flow A* flows, i.e., there were sensed 6.45% more *Flow B* flows than *Flow A* ones.

As it was expected, the system was not able to detect flows during late night/early morning hours. During the time period between 0:00H and 7:00H there were detected just three *Flow A* flows and two *Flow B* ones. These results are consistent with the previously presented findings in Section 4.1, since during that period of time the number of detected devices was negligible.

The system sensed the highest number of movements between both sensors (for both flow types) at the period of time between 8:30H and 9:00H, which corresponds to the school opening hours (i.e., most of school hours start at 8:30H or 8:45H).

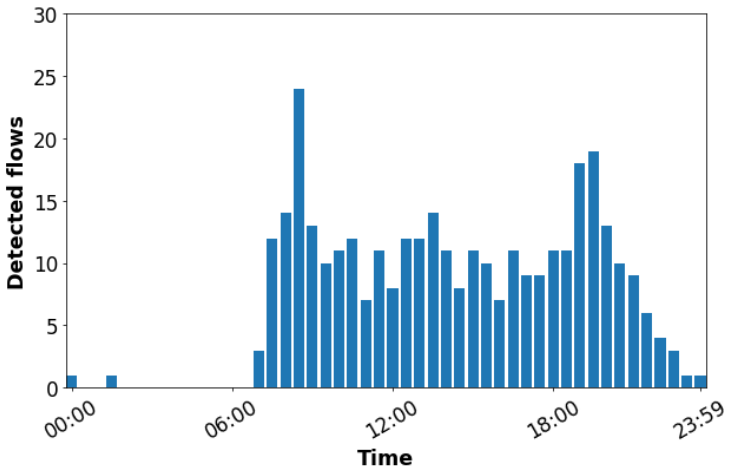


Fig. 5. Mean number of detected *Flow B* flows over the day for *working days*.

Besides, both flow types exhibited two different less marked peaks: the first one around 14:00H and the second one around 19:30H. These times correspond to school end times for the morning and late shift classes, respectively.

According to these results, in which there were a high amount of detected devices at opening hours and two lower and two noticeable rises during both school end times, we can conclude that there exists a set of people that arrives at morning and stays at the campus until late afternoon. This is quite common at UMA since there are a number of students that have to attend classes during morning and afternoon (or stays in the libraries). In general, these students use to eat in the canteen of their faculties. For this reason there were not peaks of movement during lunch time.

These insights have a direct benefit for the university managers, since they are able to show that the selection of the same opening and ending school hours for different university schools provokes the highest movement of students at similar hours. Thus, some crowding and congestion problems could be mitigated by shifting the scholar schedules.

Finally, we analyzed the speed of the detected movements. Fig. 6 illustrates the mean speed detected during every half hour. There is not values during the period of time between midnight and 7:00H because there were not registered representative flows. As it can be observed, these speeds are in average relatively high for people moving by foot, about 2.8 m/s (10.1 km/h) and 3.1 m/s (11.2 km/h). This is mainly because the sensors were able to detect flows of people moving by using vehicles, e.g., bikes and cars, and people running. The movement with maximum speed sensed by our sensor was of 13.1 m/s (47.2 km/h), which would correspond to a car moving in a urban area.

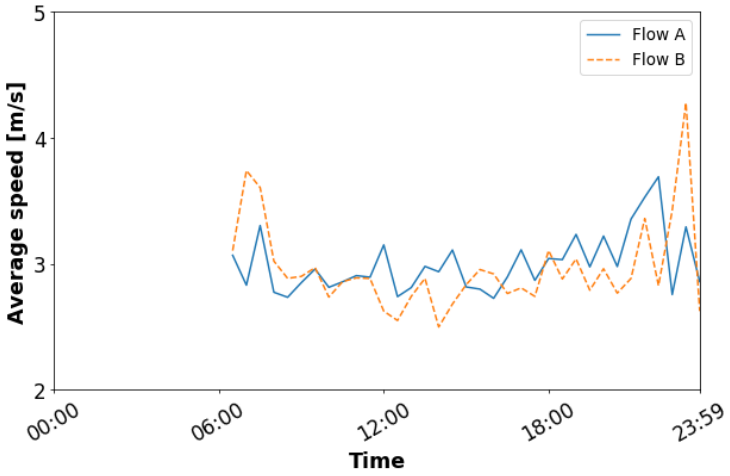


Fig. 6. Average speed of *Flow A* and *Flow B* over time.

5 Conclusions and Future Work

In this paper we studied the human spatio-temporal behavior (movement) in the Campus of Teatinos of UMA by using a WSN installed in specific locations of interest in the campus. The main aim of this study is to understand the behavior and movement of the the people of the university community through the campus, which can be helpful for the university managers.

As it has been shown, the data registered by the system regarding Wi-Fi devices were useful to analyze the human flows in the campus. The results obtained confirmed numerically important intuitive observations about the movement of the people of the university community.

Thus, we showed that the are not barely people crossing the campus during late-night/early mornings hours (from 0:00H to 7:00H). In turn, the most mobility occurs during the opening (about 8:30H) and ending (about 14:00H and 19:30H) school hours. This is principally due to that the street analyzed (Boulevard Louis Pasteur) corresponds with a specifically university area (no residential area). Therefore, the system captures data from people of the university community during class schedule. Besides, we observed that there was a similar amount of flows in both studied directions (*Flow A* and *Flow B*). Finally, it is noticeable that the sensors are able to register vehicular mobility data.

As future work we plan to extend the proposed methodology by analyzing spatio-temporal behavior through the campus by combining the information of more installed sensors, applying a specific methodology to identify pedestrian and individuals moving by using vehicles, and studying together the movement knowledge extracted with other data registered by the sensors (e.g., environmental noise).

Acknowledgements

This research has been partially funded by the Spanish MINECO and FEDER projects TIN2017-88213-R (http://6city.lcc.uma.es) and TIN2016-81766-REDT (http://cirti.es). University of Malaga. International Campus of Excellence Andalucia TECH.

References

1. Abedi, N., Bhaskar, A., Chung, E., Miska, M.: Assessment of antenna characteristic effects on pedestrian and cyclists travel-time estimation based on bluetooth and wifi mac addresses. Transportation Research Part C: Emerging Technologies **60**, 124–141 (2015)
2. Axhausen, K.W., Zimmermann, A., Schönfelder, S., Rindsfüser, G., Haupt, T.: Observing the rhythms of daily life: A six-week travel diary. Transportation **29**(2), 95–124 (2002)
3. Camero, A., Toutouh, J., Stolfi, D.H., Alba, E.: Evolutionary Deep Learning for Car Park Occupancy Prediction in Smart Cities. In: Learning and Intelligent OptimizatioN Conference LION (2018)
4. Fujino, T., Kitazawa, M., Yamada, T., Takahashi, M., Yamamoto, G., Yoshikawa, A., Terano, T.: Analyzingin-store shopping paths from indirect observation with rfidtags communication data. Journal on Innovation and Sustainability. RISUS ISSN 2179-3565 **5**(1), 88–96 (2014)
5. Hagemann, W., Weinzerl, J.: Automatische erfassung von umsteigern per bluetooth-technologie. Nahverkerspraxis. Springer Berlin Heidelberg pp. 31–68 (2008)
6. Haseman, R., Wasson, J., Bullock, D.: Real-time measurement of travel time delay in work zones and evaluation metrics using bluetooth probe tracking. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board (2169), 40–53 (2010)
7. Husted, N., Myers, S.: Mobile location tracking in metro areas: malnets and others. In: Proceedings of the 17th ACM conference on Computer and communications security. pp. 85–96. ACM (2010)
8. Leduc, G.: Road traffic data: Collection methods and applications. Working Papers on Energy, Transport and Climate Change **1**(55) (2008)
9. Liebig, T., Wagoum, A.U.K.: Modelling microscopic pedestrian mobility using bluetooth. In: ICAART (2). pp. 270–275 (2012)
10. Luque, J., Toutouh, J., Alba, E.: Reduction of the Size of Datasets by using Evolutionary Feature Selection: the Case of Noise in a Modern City. In: Conference of the Spanish Association for Artificial Intelligence (CAEPIA) 2018. pp. 1–10. Springer (2018)
11. McMichael, I., Khoshnevisan, M.: Uniform sensitivity light curtain (Jul 23 1996), uS Patent 5,539,198
12. Millonig, A., Gartner, G.: Shadowing-tracking-interviewing: How to explore human spatio-temporal behaviour patterns. In: BMI. pp. 1–14. Citeseer (2008)
13. Mir, Z.H., Toutouh, J., Filali, F., Alba, E.: Qos-aware radio access technology (RAT) selection in hybrid vehicular networks. In: International Workshop on Communication Technologies for Vehicles. pp. 117–128. Springer (2015)

14. Nesmachnow, S., Rossit, D., Toutouth, J.: Comparison of multiobjective evolutionary algorithms for prioritized urban waste collection in montevideo, uruguay. Electronic Notes in Discrete Mathematics (2018), in press
15. Oosterlinck, D., Benoit, D.F., Baecke, P., Van de Weghe, N.: Bluetooth tracking of humans in an indoor environment: An application to shopping mall visits. Applied geography **78**, 55–65 (2017)
16. Pirzada, N., Nayan, M.Y., Hassan, F.S.M.F., Khan, M.A.: Device-free localization technique for indoor detection and tracking of human body: A survey. Procedia-Social and Behavioral Sciences **129**, 422–429 (2014)
17. Sapiezynski, P., Stopczynski, A., Gatej, R., Lehmann, S.: Tracking human mobility using wifi signals. PloS one **10**(7), e0130824 (2015)
18. Saxena, S., Brémond, F., Thonnat, M., Ma, R.: Crowd behavior recognition for video surveillance. In: International Conference on Advanced Concepts for Intelligent Vision Systems. pp. 970–981. Springer (2008)
19. Van der Spek, S., Van Schaick, J., De Bois, P., De Haan, R.: Sensing human activity: Gps tracking. Sensors **9**(4), 3033–3055 (2009)
20. Stolfi, D.H., Alba, E.: Smart mobility policies with evolutionary algorithms: The adapting info panel case. In: Proceedings of the 2015 Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation. pp. 1287–1294. GECCO '15, ACM, New York, NY, USA (2015)
21. Toutouh, J., Arellano-Verdejo, J., Alba, E.: Enabling low cost smart road traffic sensing. In: The 12th edition of the Metaheuristics International Conference (MIC 2017). pp. 13–15 (2017)
22. Toutouh, J., Rossit, D., Nesmachnow, S.: Computational intelligence for locating garbage accumulation points in urban scenarios. In: Learning and Intelligent OptimizatioN (LION) 12. pp. 1–15. Springer (2018)
23. Versichele, M., Neutens, T., Claeys Bouuaert, M., Van de Weghe, N.: Time-geographic derivation of feasible c o-presence opportunities from network-constrained episodic movement data. Transactions in GIS **18**(5), 687–703 (2014)
24. Versichele, M., Neutens, T., Delafontaine, M., Van de Weghe, N.: The use of bluetooth for analysing spatiotemporal dynamics of human movement at mass events: A case study of the ghent festivities. Applied Geography **32**(2), 208–220 (2012)
25. Wang, Y., Yang, J., Chen, Y., Liu, H., Gruteser, M., Martin, R.P.: Tracking human queues using single-point signal monitoring. In: Proceedings of the 12th annual international conference on Mobile systems, applications, and services. pp. 42–54. ACM (2014)
26. Yamin, M., Ades, Y.: Crowd management with rfid and wireless technologies. In: Networks and Communications, 2009. NETCOM'09. First International Conference on. pp. 439–442. IEEE (2009)
27. Yu, Z., Liang, Y., Xu, B., Yang, Y., Guo, B.: Towards a smart campus with mobile social networking. In: 2011 International Conference on Internet of Things and 4th International Conference on Cyber, Physical and Social Computing. pp. 162–169 (2011)

Optimization of the dimensioning process of a very low enthalpy geothermal installation

Cristina Sáez Blázquez[1] [0000-0002-5333-0076], Ignacio Martín Nieto[2], Arturo Farfán Martín[3] and Diego González-Aguilera[4] [0000-0002-8949-4216]

[1] TIDOP Group, Department of Cartographic and Land Engineering, University of Salamanca, Higher Polytechnic School of Avila, Hornos Caleros 50, 05003 Avila, Spain
u107596@usal.es

Abstract.
The implementation of the very low geothermal energy is not as extended as the rest of renewable energies. The high initial investment these systems usually require makes them unaffordable for most users. In this regard, this research tries to emphasize the importance of a suitable dimensioning of the whole geothermal plant. With that aim, three different calculation methods have been presented. One of them is based on manual calculations using standard values while the two remaining assumptions consider the use of specific geothermal software. Results reveal that the most suitable method is constituted by the implementation of optimized parameters in the geothermal software. These parameters are obtained from a series of previous analysis and laboratory tests. Applying the most appropriated procedure the initial investment is considerably reduced. Additionally, the electricity consumption of the heat pump is also lower using the mentioned calculation. In this way, the present research demonstrates that and adjusted and proper calculation process can make the geothermal system more attractive for a large number of users.

Keywords: Very low geothermal energy, dimensioning, optimized parameter, geothermal software.

1 Introduction

Climatic change is a vital importance issue that nowadays requires the development of new strategies to deal with it. One of the main causes of this phenomenon is the greenhouse gases emission which has exponentially increased during the last century. In 2016, at the United Nations Paris Agreement, 195 countries were involved to combat the climatic change [1]. In this regard, renewable energies play a fundamental role to reduce or eliminate the carbon dioxide emissions. According to the International Energy Agency [2], renewable energies will contribute to reduce the 32% of the global emissions during the period 2013-2050. However, one of the main problems most of these clean energies present is the dependence on the climatic conditions (solar radiation, wind velocity…). This fact could generate contradictions between the energetic production and the demand required by the user.

One of the renewable energies whose use is not dependent on the external conditions is the geothermal energy. This energy allows extracting the internal earth heat to use it in a certain use. In particular, the very low enthalpy geothermal energy can be used anywhere on the earth surface to produce sanitary hot water or to warm/cool a space. Since the earth temperature stays constant at the depth of 15 meters, the climatological conditions do not affect the capacity of thermal exchange in this kind of installations [3-5]. Despite the large number of advantages these system present (reduced CO_2 emissions, climatic conditions independence, constant energetic supply…), its use is not widespread in the current moment and it is quite lower in comparison with the remaining green energies [6-9]. The principal reason of this fact is the initial investment these installations require. Although the amortization periods are considerably low, the high investments mean an important problem at the time of opting for its implementation [10-12].

On this matter, an optimal dimensioning of the geothermal installation could achieve significant reductions of the global investment. In this research, three different calculation procedures were applied on the same study case to finally present an economic comparison. One of these methods is based on the optimization of the parameters that are part of the geothermal calculation while the rest of procedures use standard values. The structure of the manuscript includes a general description of the study case and each of the methodologies applied, and the corresponding sections of results, discussion and final conclusions.

2 Materials and method

2.1 Study case description

As mentioned before, in this research the dimensioning of a very low geothermal installation was made by the implementation of several procedures. With that aim, in the first place, the initial conditions of the study case on which this research is focused are defined in Table 1.

Table 1. Study case description.

Study case characteristics	
Building surface (m^2)	180
Location	Province of Ávila (Spain)
Energetic demand (kWh)	35.000
Geology	Granitic materials

2.2 Methodology

Since nowadays, there is not specific regulation establishing a standardized method to calculate a very low enthalpy geothermal system, three different procedures were followed in this research for the dimensioning of the planned installation. Figure 1 shows each of the mentioned methodologies.

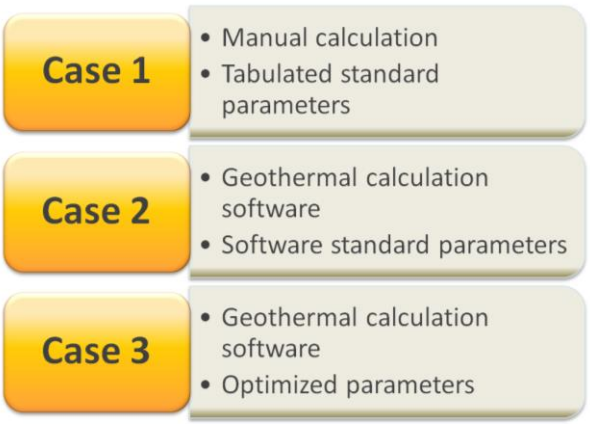


Fig. 1. Methodologies used in the geothermal calculations of the suggested installation.

Below, each of the procedures previously presented are thoroughly described.

Case 1

The first method is characterized by the manual calculation of the geothermal configuration. This procedure, based on tabulated parameters, is usually applied when the heating power is lower 30 kW since more accurate methods are not economically justified.

The sequence followed in this first case is:

- Determination, from tables, of the ground specific thermal capacity.

- Calculation of the heat pump evaporator power.
  For its estimation, the following expression is required.

$$P_e = P_c x(COP - 1)/COP \quad (1)$$

  Where:
  P_e = heat pump evaporator power.
  P_c = heating power.
  COP = performance operation coefficient of the heat pump.

- Drilling length calculation. The drilling length is obtained from the expression presented in Equation 2.

$$L = P_e / C_t \quad (2)$$

Where:
L = drilling length.
P_e = heat pump evaporator power.
C_t = Terrain thermal capacity.

The initial parameters used in this first case can be found in Table 2.

Table 2. Initial parameters considered in the calculation of case 1.

Initial parameters used in case 1	
Ground thermal capacity (W/m)	55
Heating demand (kWh)	35.000
Annual operation period (h)	2.400
Heating power (kW)	15

Case 2

The second procedure followed in this research is based on the use of the specific software of geothermal calculations Earth Energy Designer *"EED"*, developed by Blocon Software. This program requires, from the user, the introduction of a series of characteristic parameters of the area and installation. In this second case, these parameters were taken from standard values that the software suggests. These values are shown in Table 3.

Table 3. Initial parameters introduced in EED software in case 2.

Initial parameters used in case 2	
Ground thermal conductivity (W/mK)	2,10
Grouting material thermal conductivity (W/mK)	0,70
Heat exchangers	Double-U
Working fluid	Mono-ethylene glycol
Drilling diameter (mm)	150
Annual operation period (h)	2.400
Heating power (kW)	15

Case 3

In the last case considered in this research, the geothermal calculation was equally made by using EED software. In this assumption, the parameters this software re-

quires were experimentally obtained. In this way, the optimization of the geothermal dimensioning is based on a series of laboratory tests and works in the area projected for the study. Additional costs are not generated given that these tests are part of existing databases. The results of these tests that, can be found as scientifically publications, allowed defining the following parameters:

- Geological and thermal characterization of the materials where the building is planned to be set. By the geological exploration of the area and after laboratory measurements on the ground materials, the thermal conductivity of the subsoil was obtained. This property plays a fundamental role in this kind of systems since it determines the capacity of the ground to transmit the heat to the rest of geothermal components.
  Given that the location of the geothermal system is known, consulting the geothermal map developed for the province of Avila, the thermal conductivity of the ground in the study area has the value of 3 W/mK. Figure 2 presents the mentioned geothermal map of Avila.

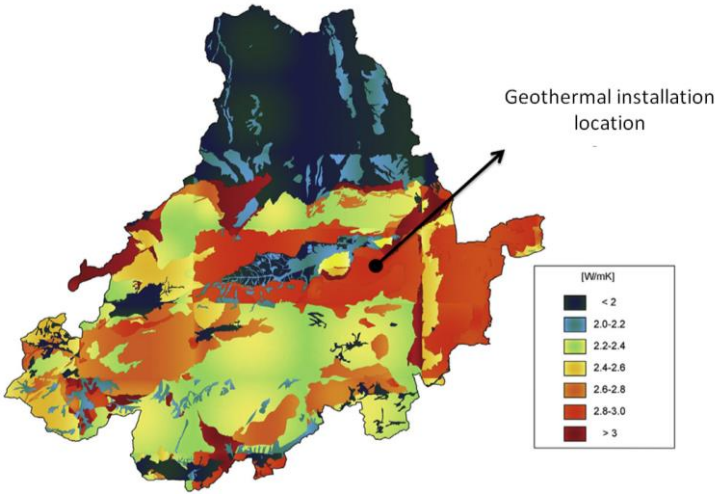


Fig. 2. Geothermal map of the province of Avila [13].

- Selection of the grouting material with the most suitable properties. This material is commonly used in geothermal drillings to guarantee the transmission of the heat from the ground to the working fluid. Based on previous researches [14], the most appropriate grouting material for the conditions of this study (assuming that there are not watercourses in the subsoil) is the mixture of aluminum cement-sand-aluminum shavings. Such material has the proper technical and mechanical conditions and reaches a thermal conductivity value of 2,789 W/mK.

- Heat exchangers design. After different laboratory tests, the helical heat exchangers presented the best results. However, its implementation is not appro-

priated for some locations given the drilling diameters they require. In this case, the ground is constituted by granitic materials and the current drilling methods do not guarantee to reach the diameter sizes required. For this reason, vertical heat exchangers were selected. Despite the double-U heat exchangers are the option usually chosen, laboratory tests showed that simple-U heat exchangers present the same results than the double-U ones [15]. Thus, the vertical simple-U heat exchangers were used in the calculation of the mentioned case 3.

As a result of the studies previously described, the initial values introduced during the process of calculation of EED software can be observed in Table 4.

Table 4. Initial parameters introduced in EED software in case 3.

Initial parameters used in case 3	
Ground thermal conductivity (W/mK)	3,00
Grouting material thermal conductivity (W/mK)	2,79
Heat exchangers	Simple-U
Working fluid	Mono-etilenglicol
Drilling diameter (mm)	150
Annual operation period (h)	2.400
Heating power (kW)	15

3 Results

By the implementation of each of the procedures described in the previous section, results derived from the calculation in each of the cases are shown below.

3.1 Case 1

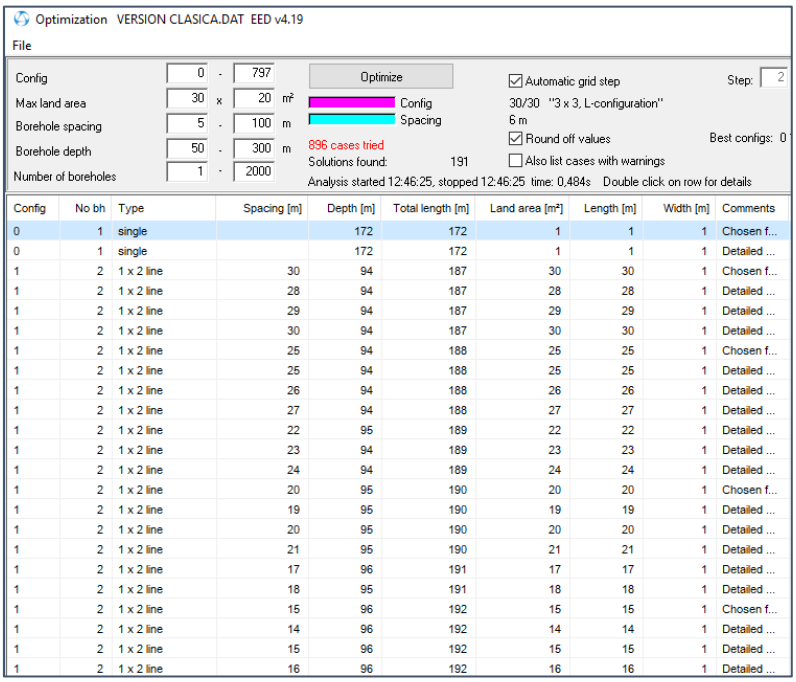
Using equations 1 and 2 presented in the methodology section, the configuration of the geothermal system using the first method can be found in Table 5.

Table 5. Geothermal system obtained using the procedure of case 1.

Installation configuration using case 1	
Evaporator power (kW)	11,67
Total drilling length (m)	212
Number of drillings	2

3.2 Case 2

Based on the introduction in EED of the parameters presented in the previous section for this second case, the software provides the design of the geothermal system (drilling length and number of boreholes) and the evolution of the fluid temperature during the period of the installation operation. From the multiple configuration suggested by the software, the first option was selected.



Config	No bh	Type	Spacing [m]	Depth [m]	Total length [m]	Land area [m²]	Length [m]	Width [m]	Comments
0	1	single		172	172	1	1	1	Chosen f...
0	1	single		172	172	1	1	1	Detailed ...
1	2	1 x 2 line	30	94	187	30	30	1	Chosen f...
1	2	1 x 2 line	28	94	187	28	28	1	Detailed ...
1	2	1 x 2 line	29	94	187	29	29	1	Detailed ...
1	2	1 x 2 line	30	94	187	30	30	1	Detailed ...
1	2	1 x 2 line	25	94	188	25	25	1	Chosen f...
1	2	1 x 2 line	25	94	188	25	25	1	Detailed ...
1	2	1 x 2 line	26	94	188	26	26	1	Detailed ...
1	2	1 x 2 line	27	94	188	27	27	1	Detailed ...
1	2	1 x 2 line	22	95	189	22	22	1	Detailed ...
1	2	1 x 2 line	23	94	189	23	23	1	Detailed ...
1	2	1 x 2 line	24	94	189	24	24	1	Detailed ...
1	2	1 x 2 line	20	95	190	20	20	1	Chosen f...
1	2	1 x 2 line	19	95	190	19	19	1	Detailed ...
1	2	1 x 2 line	20	95	190	20	20	1	Detailed ...
1	2	1 x 2 line	21	95	190	21	21	1	Detailed ...
1	2	1 x 2 line	17	96	191	17	17	1	Detailed ...
1	2	1 x 2 line	18	95	191	18	18	1	Detailed ...
1	2	1 x 2 line	15	96	192	15	15	1	Chosen f...
1	2	1 x 2 line	14	96	192	14	14	1	Detailed ...
1	2	1 x 2 line	15	96	192	15	15	1	Detailed ...
1	2	1 x 2 line	16	96	192	16	16	1	Detailed ...

Fig. 3. Geothermal dimensioning made with EED using the standard parameters.

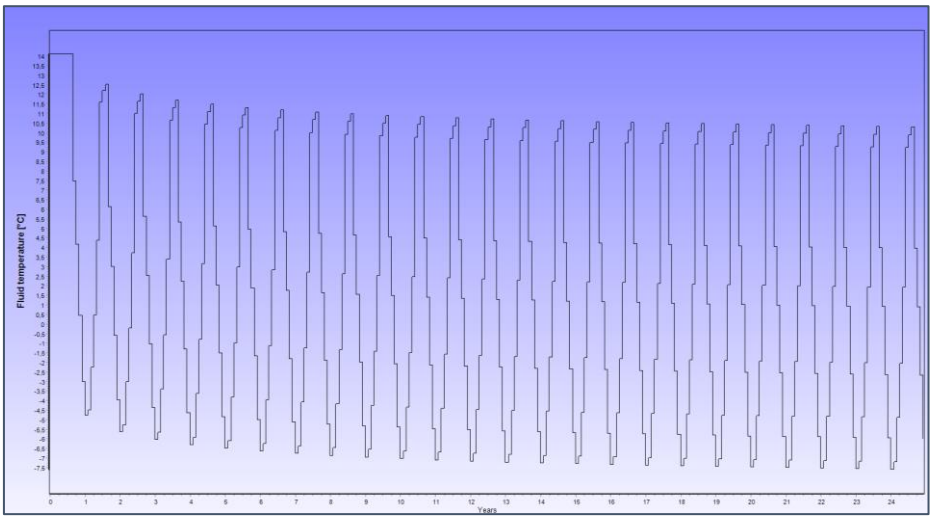


Fig. 4. Fluid temperature evolution using the standard parameters.

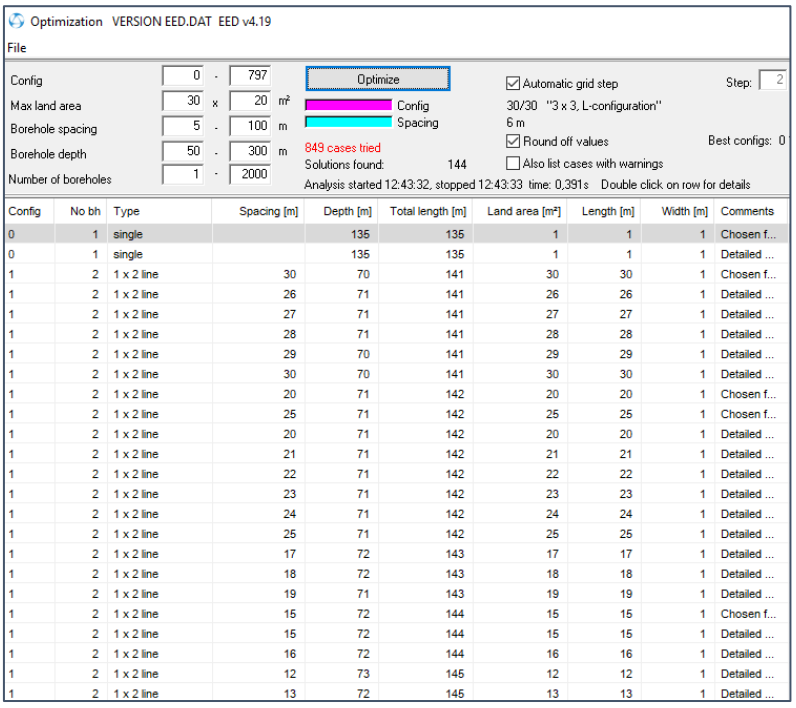
The following Table 6 collects the design of the installation according to the calculation previously presented.

Table 6. Geothermal design obtained using the procedure of case 2.

Installation design in case 2	
Number of boreholes	1
Total drilling length (m)	172
Medium fluid temperature (°C)	3,25

3.3 Case 3

As in the previous case, EED software provides the design of the drilling and the evolution of the working fluid. In this case, the optimized parameters were implemented. The following Figures 5 and 6 show the described process.



Optimization VERSION EED.DAT EED v4.19

File

Config 0 - 797 | Max land area 30 x 20 m² | Borehole spacing 5 - 100 m | Borehole depth 50 - 300 m | Number of boreholes 1 - 2000

Optimize

Config

Spacing

849 cases tried

Solutions found: 144

Automatic grid step | Step: 2

30/30 "3 x 3, L-configuration"

6 m

Round off values | Best configs: 0

Also list cases with warnings

Analysis started 12:43:32, stopped 12:43:33 time: 0,391s Double click on row for details

Config	No bh	Type	Spacing [m]	Depth [m]	Total length [m]	Land area [m²]	Length [m]	Width [m]	Comments
0	1	single		135	135	1	1	1	Chosen f...
0	1	single		135	135	1	1	1	Detailed ...
1	2	1 x 2 line	30	70	141	30	30	1	Chosen f...
1	2	1 x 2 line	26	71	141	26	26	1	Detailed ...
1	2	1 x 2 line	27	71	141	27	27	1	Detailed ...
1	2	1 x 2 line	28	71	141	28	28	1	Detailed ...
1	2	1 x 2 line	29	70	141	29	29	1	Detailed ...
1	2	1 x 2 line	30	70	141	30	30	1	Detailed ...
1	2	1 x 2 line	20	71	142	20	20	1	Chosen f...
1	2	1 x 2 line	25	71	142	25	25	1	Chosen f...
1	2	1 x 2 line	20	71	142	20	20	1	Detailed ...
1	2	1 x 2 line	21	71	142	21	21	1	Detailed ...
1	2	1 x 2 line	22	71	142	22	22	1	Detailed ...
1	2	1 x 2 line	23	71	142	23	23	1	Detailed ...
1	2	1 x 2 line	24	71	142	24	24	1	Detailed ...
1	2	1 x 2 line	25	71	142	25	25	1	Detailed ...
1	2	1 x 2 line	17	72	143	17	17	1	Detailed ...
1	2	1 x 2 line	18	72	143	18	18	1	Detailed ...
1	2	1 x 2 line	19	71	143	19	19	1	Detailed ...
1	2	1 x 2 line	15	72	144	15	15	1	Chosen f...
1	2	1 x 2 line	15	72	144	15	15	1	Detailed ...
1	2	1 x 2 line	16	72	144	16	16	1	Detailed ...
1	2	1 x 2 line	12	73	145	12	12	1	Detailed ...
1	2	1 x 2 line	13	72	145	13	13	1	Detailed ...

Fig. 5. Geothermal dimensioning made with EED using the optimized parameters.

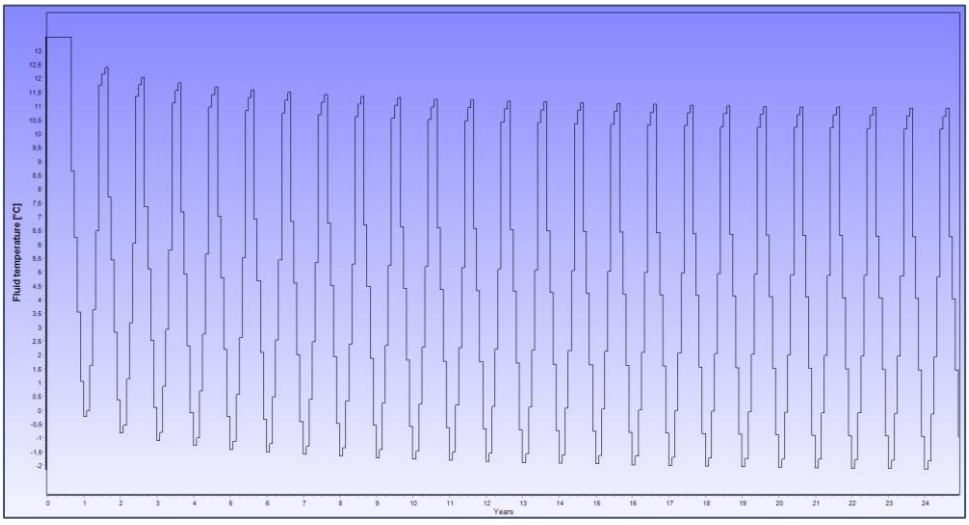


Fig. 6. Fluid temperature evolution using the optimized parameters.

Results from the calculation showed in Figures 5 and 6 have been collected in Table 7.

Table 7. Geothermal design obtained using the procedure of case 3.

Installation design in case 3	
Number of boreholes	1
Total drilling length (m)	135
Medium fluid temperature (°C)	5,38

4 Discussion

Results show that the total drilling length is considerably reduced using the optimized parameters. Consequently, the number of geothermal components required is equally lower. This fact means the reduction of the initial investment of the global geothermal system. Table 8 shows the initial investment of each of the assumptions considered in this research. The economic estimation was carried out using the commercial catalogs of *Enertres, Raugeo* y *Alb* and considering that the drilling prize of the area was 44 €/linear meter.

Table 8. Initial investment of the geothermal installation in function of the procedure implemented.

	Case 1	**Case 2**	**Case 3**
Drillings	9.328,00	7.568,00	5.940,00
Heat exchangers	7.252,00	5.505,47	2.752,73
Grouting material	4,90	3,50	4,00
Working fluid	682,00	553,32	434,29
Spacers	378,00	306,00	252,00
Accessory components	1.271,00	635,50	635,50
Heat pump	12.530,00	12.530,00	12.530,00
Total investment	31,445.90	27.101,79	22,577.23

* All values are presented in euros (€)

Another difference among the scenarios considered in this research makes reference to the fluid temperature. This factor has a direct influence on the operation coefficient of the heat pump (COP). It also determines the relation between the power provide by the heat pump and the electricity consumption. The COP of the heat pumps selected in this research has the value of 4,7 for some specific working conditions (inlet fluid temperature of 0°C and outlet temperature of 35°C according to EN14511 Law [16]). Additionally, UE 813/2013 Regulation [17] establishes a certain relation between the COP and the working fluid temperature. Considering the medium fluid temperatures in each of the assumptions, the real COP of the heat pump in

each case was calculated. Finally, the electricity consumption and the annual electricity costs were also determined.

In the case 1, since the method do not allow to know the fluid temperature, a COP of 4,5 wasassumed. A lower COP results from the elevated drilling length required using the procedure of case 1.

Table 9. Heat pump COP and electricity consumption associated to the heat pump use in each case.

	Case 1	**Case 2**	**Case 3**
Heat pump power (kW)	15,00	15,00	15,00
Energetic demand (kWh)	35.000	35.000	35,000
Real COP	4,50	4,85	4,94
Electricity consumption (kWh)	7.777,77	7.216,49	7,085.02
Annual cost (€)	945,70	877,45	861,47
Accumulative total cost, year 30 (€)	28.371,00	26.323,50	25.844,10

* The electricity prize considered was 0.12159 €/kWh.

As can be seen in Table 9, the difference in the annual costs among the three assumptions is mostly insignificant. However, beyond the economic field, the fluid temperature has a great importance on the heat pump operation. If this temperature was too low, the heat pump could not work properly and the thermal exchange with the ground could be damaged. For this reason, it is important to achieve the highest possible fluid temperatures and, it can be reached using an optimal geothermal dimensioning.

In the graphic presented in Figure 7, the total cost (initial investment and outlay derived from the operation of the system at the end of the operation period) of the installation can be observed for each of the methods described here.

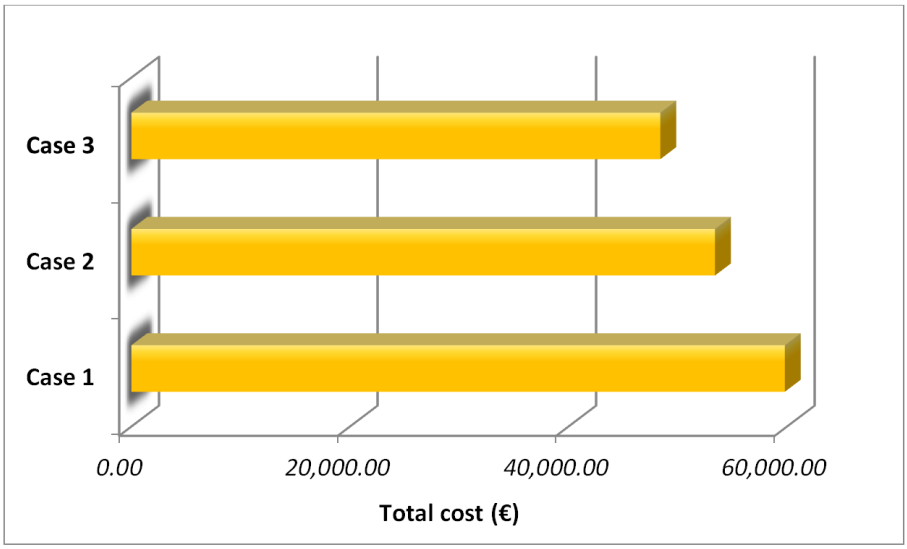


Fig. 7. Total cost of the geothermal system in the year 30 in function of the calculation procedure applied.

5 Conclusions

In the present research, the dimensioning of the geothermal installation was carried out implementing three different methods. According to the results presented above, some consideration can be established.

- The manual calculation constitutes the easiest but also the most imprecise alternative. Thus, the total drilling length is incremented 18.87% in comparison with the procedure of case 2 and 36.32% in comparison with case 3.
- Regarding the use of EED software, it is the most appropriate solution for a geothermal calculation. However, its use is usually recommended only when the heating power is higher than 30 kW.
- In addition to the use of EED software, the optimization of the geothermal parameters is also convenient. As shown in this research, when these parameters are correctly defined, the design of the system is adjusted and the total budget is considerably reduced.
- For the study case described here, the implementation of software EED using the optimized parameters reaches the reduction of the initial investment in 21.51% in relation to using standard values.
- The heat pump operation is also improved using the method of case 3. Thus, the electricity consumption of this device is also reduced meaning an additional economic saving in the long time period.

For the reasons presented, a proper geothermal dimensioning could mean an increase in the number of very low enthalpy geothermal systems making them more affordable for the general user.

References

1. United Nations Framework Convention on Climate Change, 2016. Historic Paris Agreement on Climate Change.

2. Energy Technology Perspectives 2016 – Towards Sustainable Urban Energy Systems; OECD/IEA: Paris, 2016. http://www.iea.org/etp2016/ (accessed 2018/05/25).

3. Rüdiger Schellschmidt, Burkhard Sanner, Sandra Pester, Rüdiger Schulz, Geothermal Energy Use in Germany. Proceedings World Geothermal Congress 2010

4. John W Lund, Derek H Freeston, World-wide direct uses of geothermal energy 2000. Geothermics, 30, 29-68 (2001).
5. Ingvar B Fridleifsson, Geothermal energy for the benefit of the people. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 5 (3), 299-312 (2001).

6. Sarbu, I., Sebarchievici, C., Dorca, A., Simulation of ground thermo-physical capacity for a vertical closed-loop ground-coupled heat pump system. International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM, 17, Issue 42, 557-565 (2017).

7. Sliwa T., Nowosiad T., Vytyaz, O., Sapinska-Sliwa, A., Study on the efficiency of deep borehole heat exchangers. SOCAR Proceedings, 2, 29-42 (2016).

8. Evanthia A. Nanaki, George A. Xydis, Deployment of Renewable Energy Systems: Barriers, Challenges, and Opportunities. Advances in Renewable Energies and Power Technologies, 2, 207-229 (2018).

9. Carolina Fraga, Pierre Hollmuller, Stefan Schneider, Bernard Lachal, Heat pump systems for multifamily buildings: Potential and constraints of several heat sources for diverse building demands. Applied Energy, 225, 1033–1053 (2018).

10. Jaemin Jeong, Taehoon Hong, Jimin Kim, Myeongsoo Chae, Changyoon Ji, Multi-criteria analysis of a self-consumption strategy for building sectors focused on ground source heat pump systems. Journal of Cleaner Production, 186, 68-80 (2018).

11. Jin Luo, Zequan Luo, Jihai Xie, Dongsheng Xia, Wei Huang, Haibin Shao, Wei Xiang, Joachim Rohn, Investigation of shallow geothermal potentials for different types of ground source heat pump systems (GSHP) of Wuhan city in China. Renewable Energy, 118, 230-244 (2018).

12. Jin Luo, Zequan Luo, Jihai Xie, Dongsheng Xia, Wei Huang, Haibin Shao, Wei Xiang, Joachim Rohn, Investigation of shallow geothermal potentials for different types of ground source heat pump systems (GSHP) of Wuhan city in China. Renewable Energy, 118, 230-244 (2018).

13. Cristina Sáez Blázquez, Arturo Farfán Martín, Ignacio Martín Nieto, Pedro Carrasco García, Luis Santiago Sánchez Pérez, Diego González Aguilera. Thermal conductivity map of the Avila region (Spain) based on thermal conductivity measurements of different rock and soil samples. Geothermics 65 60–71(2017).

14. Cristina Sáez Blázquez, Arturo Farfán Martín, Ignacio Martín Nieto, Pedro Carrasco García, Luis Santiago Sánchez Pérez, Diego González-Aguilera. Analysis and study of different grouting materials in vertical geothermal closed-loop systems. Renewable Energy, 114 1189-1200 (2017).

15. Cristina Sáez Blázquez, Arturo Farfán Martín, Ignacio Martín Nieto, Pedro Carrasco García, Luis Santiago Sánchez Pérez and Diego González-Aguilera. "Efficiency Analysis of the Main Components of a Vertical Closed-Loop System in a Borehole Heat Exchanger", Energies, 10, 201-216 (2017).

16. AENOR, UNE-EN 14511-1:2014, Acondicionadores de aire, enfriadoras de líquido y bombas de calor con compresor accionado eléctricamente para la calefacción y la refrigeración de locales. Parte 1: Términos y definiciones., (2014).

17. Diario Oficial de la Unión Europea, REGLAMENTO (UE) Nº 813/2013 DE LA COMISIÓN de 2 de agosto de 2013 por el que se desarrolla la Directiva 2009/125/CE del Parlamento Europeo y del Consejo respecto de los requisitos de diseño ecológico aplicables a los aparatos de calefacción y a los calefactores combinados, (2013).

Análisis de la huella de carbono de la ETSIT de la UPM y propuesta de mejora basada en datos de la plataforma IoT Smart CEI Moncloa

Ramón Inarejos[1], Ana Rodríguez[1], Gregorio López[1], Manuel Alvarez-Campana[1], Carmen Avilés[1]

[1] Universidad Politécnica de Madrid, Calle Ramiro de Maeztu, 7, 28040 Madrid

Resumen. La situación ambiental actual es una de las principales responsables de la búsqueda de nuevas tecnologías más eficientes, de la adopción de medidas para reducir el consumo de recursos y del desarrollo de herramientas para estudiar el impacto medioambiental que provoca la actividad humana, entre otras muchas acciones. La Universidad juega un papel importante en este ámbito ya que puede tanto investigar en cómo reducir el impacto medioambiental de las organizaciones como formar a nuevos profesionales proporcionándoles herramientas para hacerlo. Además, las TIC, en general, y el IoT y las técnicas de *Big Data*, en particular, pueden ser de gran utilidad en este sentido.
Este artículo presenta un estudio de la problemática ambiental en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación (ETSIT) de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM), a través de la herramienta de gestión ambiental conocida como huella de carbono. Dicho estudio se ha llevado a cabo en colaboración con la Subdirección de Asuntos Económicos e Infraestructuras de la Escuela, para obtener información relativa a consumos eléctricos y de gas, y en base a la Norma ISO 14064 y a la guía proporcionada por MAPAMA.
El artículo propone además cómo reducir el consumo eléctrico y, por tanto, la huella de carbono, de una zona en concreto de la ETSIT cambiando la tecnología de iluminación y controlando que la luz esté encendida sólo cuando haga falta en base a los datos de luminosidad y presencia recolectados por la plataforma IoT Smart CEI Moncloa, obteniendo una reducción superior al 90%.

Palabras clave: Factores de emisión, Gases de Efecto Invernadero, Huella de Carbono, Internet de las Cosas, Redes de sensores, Sostenibilidad, Tecnologías de la Información y las Comunicaciones.

1 Introducción

La situación ambiental actual es una de las principales responsables de la búsqueda de nuevas tecnologías más eficientes, de la adopción de medidas para reducir el consumo de recursos y del desarrollo de herramientas para estudiar el impacto medioambiental que provoca la actividad humana, entre otras muchas acciones. La Universidad como institución está llamada a jugar un papel importante en este ámbito por varios motivos:

por su responsabilidad social, por su capacidad investigadora y por su capacidad formadora. Además, las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (TIC), en general, y el Internet de las Cosas (IoT) y las técnicas de *Big Data*, en particular, presentan un gran potencial para este tipo de aplicaciones que aún no ha sido explorado suficientemente.

El objetivo de este artículo es presentar el estudio de la huella de carbono realizado para la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación (ETSIT) de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM) en la anualidad 2017 e ilustrar cómo se puede reducir utilizando para ello datos de una plataforma IoT.

El resto del artículo se estructura de la siguiente manera. La sección 2 presenta una breve revisión bibliográfica sobre el cambio climático y la huella de carbono en la Universidad, así como sobre normativas y metodologías para el cálculo de la huella de carbono. La sección 3 presenta el cálculo de la huella de carbono realizado para la ETSIT en la anualidad 2017. La sección 4 propone cómo reducir el consumo eléctrico y, por tanto, la huella de carbono, de una zona en concreto de la ETSIT cambiando la tecnología de iluminación y controlando que la luz esté encendida sólo cuando haga falta en base a los datos de luminosidad y presencia recolectados por la plataforma IoT Smart CEI Moncloa [1]. Por último, la sección 5 concluye el artículo y destaca algunas líneas de trabajo futuro.

2 Contexto y antecedentes

Antes de profundizar en la cuantificación de la huella de carbono de la ETSIT, se considera conveniente hacer una breve revisión bibliográfica sobre el cambio climático y la huella de carbono en la Universidad, así como de las normativas y metodologías para su cálculo.

2.1 Cambio climático y Universidad

El cambio climático es un fenómeno real que ha sido provocado por el incremento de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) en la atmósfera debido a las actividades de origen antrópico [2]. Este incremento de GEI tiene una consecuencia directa: el aumento de temperatura media terrestre (Fig. 1).

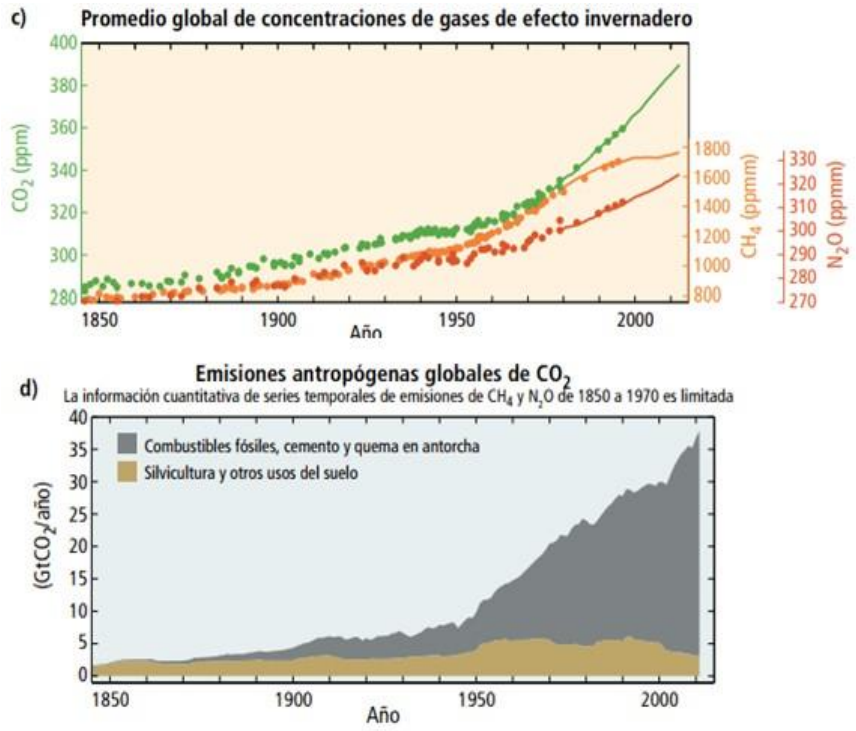


Fig. 1. Evolución de emisiones desde 1850 [2]

Este problema ambiental se ha convertido en un reto para la humanidad. Según el informe de *World Economics Forum*, el cambio climático se encuentra dentro de los cinco riesgos más importantes para el desarrollo de las actividades económicas, tanto en términos de probabilidad como de impacto [3].

Por tanto, es un problema que necesita de medidas gubernamentales y empresariales para poder combatirlo. El punto de inflexión de este compromiso gubernamental es el Protocolo de Kioto desarrollado por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, que entra en vigor en 2005. La meta era reducir las emisiones con respecto de las emisiones de 1990 de los seis GEI: dióxido de carbono (CO_2), gas metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), hidrofluorocarbonos (HFC), perfluorocarbonos (PFC) y hexafluoruro de azufre (SF_6). En la actualidad, el contrato más destacado es el compromiso adquirido en la Cumbre de París en el año 2017 donde todos los países miembros han asumido compromisos para la reducción de emisiones de GEI. Por otro lado, es necesario resaltar la incorporación exclusiva del cambio climático en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), concretamente en el objetivo número 13 "*Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos*" [4].

La Universidad no puede ser ajena a esta situación porque es una organización cuyas actividades tienen un impacto socio-ambiental muy alto y tiene el compromiso con la sociedad para construir sistemas sostenibles y con el menor impacto posible. Sus acti-

vidades principales son la docencia y la investigación, por lo que pueden aportar formación en materia de sostenibilidad y cambio climático y realizar proyectos e iniciativas para incorporar este problema ambiental en sus sistemas de gestión [5].

A nivel internacional, la referencia sobre la implementación del cambio climático en la gestión de las Universidades se encuentra en el ranking *UI GreenMetric*, que comienza su desarrollo en el año 2010 y tiene el objetivo de conocer el grado de implementación de la sostenibilidad en las estrategias universitarias y su gestión. El objetivo es reducir o eliminar los impactos ambientales producidos por las actividades de la Universidad para crear Universidades Sostenibles [6].

La incorporación de la sensibilización sobre el cambio climático en las Universidades españolas comienza en el año 2004 cuando la Conferencia de Rectores de las Universidades Españolas (CRUE) decide crear un grupo de trabajo sobre calidad ambiental y desarrollo sostenible, que tiene el objetivo de fomentar las actuaciones en el marco de la sostenibilidad en las Universidades españolas [7]. En la actualidad este grupo de trabajo se constituye como Comisión Sectorial CRUE-Sostenibilidad, donde el cambio climático tiene un papel fundamental y transversal en las distintas líneas de trabajo que se encuentran en desarrollo [8].

Por otro lado, existe el Programa Campus de Excelencia Internacional (CEI) donde se encuentra la Estrategia Universitaria 2015 (EU 2015). El objetivo del desarrollo de estas estrategias es modernizar la Universidad española mediante la integración de las mismas con otras instituciones para crear campus donde la vida universitaria se integre en su distrito urbano o territorio para ofrecer servicios de alta calidad y mejorar la sostenibilidad ambiental [9]. La EU 2015 tiene un claro compromiso con la responsabilidad social universitaria y el desarrollo sostenible de nuestro sistema universitario, así como con la contribución del mismo a la sostenibilidad social, económica y medioambiental [10]. En esta situación, el cambio climático es un impacto ambiental a tener cuenta para conseguir implementar el desarrollo sostenible y encontrar el equilibrio de las tres dimensiones de la sostenibilidad desde una perspectiva holística.

Indicadores de sostenibilidad para el cambio climático en la Universidad: Huella de carbono

El indicador de sostenibilidad que nos permite obtener una medida cuantificable, comparable y robusta de las emisiones de GEI y la contribución de las actividades humanas en el cambio climático es el indicador “huella de carbono” (HC). Este indicador representa la cantidad de GEI emitida a la atmósfera derivada de las actividades de producción o consumo de bienes y servicios [11] y se consolida en un inventario de GEI que incluye tanto las emisiones directas como indirectas de una organización, clasificadas por alcances (Fig. 2), así como sus sumideros de GEI.

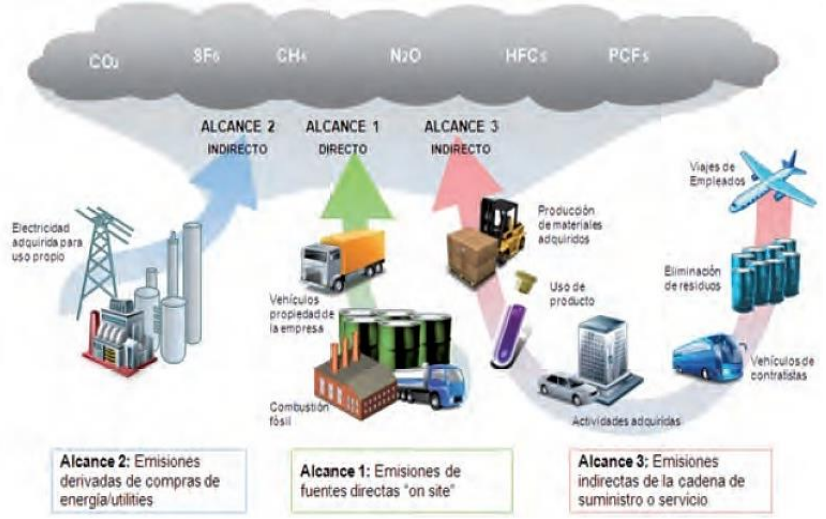


Fig. 2. Emisiones directas e indirectas de GEI clasificadas por alcance [12]

La HC se ha convertido en una de las herramientas más importantes de que disponen las organizaciones para cuantificar las emisiones de GEI y valorar así el impacto que genera la realización de su actividad sobre el medio ambiente y su contribución al proceso de cambio climático [13]. Permite establecer una relación entre la actividad productiva de una empresa, organización, entidad, producto, servicio o ciudadano y las emisiones de GEI generadas [11].

Cambio climático y huella de carbono en la Universidad Politécnica de Madrid

En este contexto, la UPM, junto con la Universidad Complutense de Madrid, forma parte del Campus de Excelencia Internacional Moncloa, con el objetivo de transformar de modo sostenible el Campus de Moncloa en un referente internacional en investigación, formación e innovación. Así, el Campus de Moncloa se autodefine como un campus sostenible, saludable y socialmente responsable [14].

Es por ello que la UPM ha desarrollado una serie de acciones para el desarrollo de una estrategia de sostenibilidad. Entre ella se encuentra el Plan de Sostenibilidad Ambiental y el Proyecto "Responsables, Sostenibles, Universitarios" (RES2+U), financiado por la Convocatoria de Acciones para Contribuir al cumplimiento de los ODS 2018, ambos promovidos por el Vicerrectorado de Calidad y Eficiencia de la UPM.

El objetivo es conocer la situación de la UPM en temas de sostenibilidad y concretamente conocer el impacto ambiental de sus actividades y su contribución al cambio climático. Por ello, la UPM ha decidido continuar con el Proyecto de Cuantificación de la Huella de Carbono iniciado en el año 2013 por el Equipo de Huella de Carbono Montes-UPM. Este hecho fue un hito para la UPM porque pudo registrar su HC en el Registro de Huella de Carbono y Proyectos de Reducción de Emisiones de Gases de

Efecto Invernadero de la Oficina Española de Cambio Climático (OECC), lo que permitió obtener el Sello "Cálculo 2013" y convertirse en la primera Universidad Pública en formar parte de esta iniciativa del Ministerio para la Transición Ecológica. De esta manera, la UPM se posiciona como referente en tema de cambio climático y desarrolla un plan de reducción de emisiones de GEI. El próximo paso es conocer la evolución de la HC para el periodo 2014-2016 para comprobar la efectividad de las medidas de reducción.

2.2 Metodologías de cuantificación de huella de carbono de organización

El indicador huella de carbono adquiere gran popularidad debido a su capacidad para valorar la contribución de las organizaciones al calentamiento global y la identificación de las fuentes de emisión y el grado de eficiencia de los recursos que generan dichas emisiones [15]. Esta situación contribuye a la existencia de dos enfoques para cuantificar la huella de carbono: enfoque de organización y enfoque de producto. La primera consiste en la recopilación de datos de consumo de la entidad y la segunda está basada en el análisis de ciclo de vida [16].

Debido a que el objeto de estudio son las Universidades, el enfoque más apropiado para cuantificar las emisiones de GEI es mediante el enfoque de organización. En este enfoque existen varias metodologías, agrupadas por la Comisión Europea [17] según se muestra en la Tabla 1.

Es importante señalar que los consensos parecen aglutinarse en torno a las normas aprobadas por la Organización Internacional de Normalización (ISO). En concreto, en lo relacionado a la organización, la Norma UNE-EN ISO 14064-1 y el informe técnico UNE-EN ISO/TR 14069:2015, que desarrolla una guía para la aplicación de la ISO 14064-1 [18].

Descripción de la Norma UNE-EN ISO 14064 y el Informe Técnico UNE-EN ISO/TR 14069

La Norma ISO 14064 es una norma internacional elaborada por la ISO en el año 2006. Está estructurada en 3 partes y contiene un conjunto de criterios para la contabilización y verificación de GEI. La Norma UNE-EN ISO 14064-1 establece los requisitos para establecer los límites de las emisiones de GEI, cuantificar las emisiones de GEI de la organización e identificar las actividades o acciones específicas para mejorar la gestión de los GEI. La Norma UNE-EN ISO 14064-2 se centra en proyectos para reducir las emisiones de GEI y la norma UNE-EN ISO 14064-3 consta de los principios y requisitos para desarrollar el proceso de verificación de los inventarios de GEI y de los proyectos de reducción [16].

En el año 2013 aparece el Informe Técnico que usa los principios y procesos de la Norma UNE-EN ISO 14064-1 para la cuantificación de las emisiones de GEI en las organizaciones [18]. El objetivo de este Informe es guiar a los usuarios en la aplicación de la Norma UNE-EN ISO 14064-1, usando pautas y ejemplos basándose en criterios de transparencia para cuantificación de emisiones y elaboración de informes [18].

Tabla 1. Metodologías de Cálculo de Huella de Carbono de Organización más importantes.

METODOLOGÍAS/INICIATIVAS	PAÍS/ REGIÓN	OBLIGACION
CARBON DISCLOSURE PROJECT	mundial	voluntario
WBCSD/WRI Y WBCSD GHG PROTOCOL	mundial	voluntario
PAS 2060	mundial	voluntario
ISO 14064:2006 (PARTES 1 A 3)	mundial	voluntario
ISO/TR 14069:2013	mundial	voluntario
WBCSD/WRI Y WBCSDGHG PROTOCOL SCOPE 3 REPORTING STANDARD	mundial	voluntario
FRENCH BILAN CARBONE	Europa	voluntario hasta 2011
DEFRA COMPANY GHG GUIDANCE	Europa	voluntario hasta 2011
UK CARBON REDUCTION	Europa	obligatorio
US EPA CLIMATE LEADERS	mundial	voluntario
US GHG PROTOCOL PUBLIC SECTOR	mundial	voluntario

Fuente: Elaboración propia y Comisión Europea, 2010

La norma UNE-EN ISO 14064 supone un beneficio para las organizaciones, ya que proporciona claridad, transparencia y coherencia para la cuantificación, el seguimiento, el informe, la validación o verificación de los proyectos e inventarios de GEI. Además facilita el desarrollo de estrategias, planes de gestión de GEI y la posibilidad de un seguimiento posterior de los mismos.

Proceso de cuantificación de la huella de carbono en la Universidad Politécnica de Madrid

Para la cuantificación de la HC de la UPM, se decide aplicar las directrices propuestas en la Norma UNE EN ISO 14064-1, donde se establecen los requisitos y orientaciones que las organizaciones deben seguir para instaurar los límites de emisiones de GEI, cuantificar las emisiones e identificar las actividades o acciones que los generan. También establece orientaciones sobre la gestión de la calidad del inventario, el informe de GEI, la auditoría interna y las responsabilidades de la organización en las actividades de verificación [19].

Para cumplir con las especificaciones de cuantificación de emisiones de GEI y principios de la Norma UNE-EN ISO 14064- 1 y UNE-EN ISO/TR 14069, la UPM sigue el procedimiento de cuantificación de emisiones de GEI desarrollado por el Equipo de Huella de Carbono Montes-UPM, mostrado en la Fig. 3.

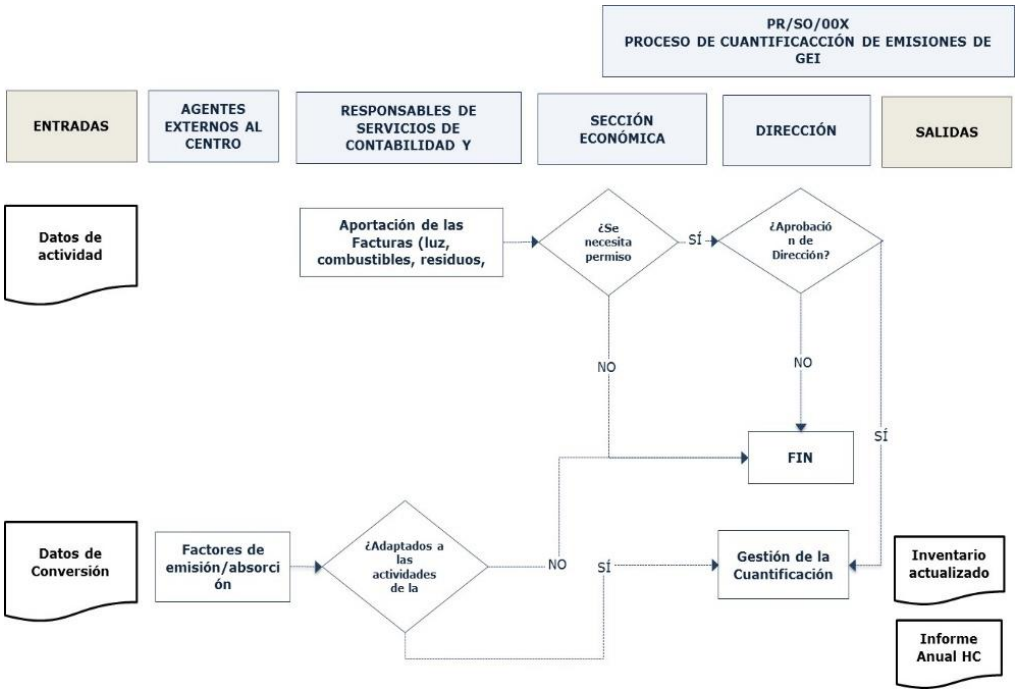


Fig. 3. Proceso de cuantificación de la huella de carbono en la UPM [20]

Según la Norma UNE-EN ISO 14064-1, las emisiones de GEI se obtendrán multiplicando los datos de actividad recopilados por factores de emisión de GEI seleccionados (Ecuación 1):

$$Emisiones\ (kg\ CO_2) = Consumos\ (un) * Factor\ de\ emisión\ \left(\frac{kg\ CO_2}{un}\right) \quad (1)$$

Donde (un), indica las unidades de cada consumo considerado.

El resultado de esta ecuación son las emisiones de GEI de cada consumo o actividad considerada en el inventario, expresado en kilos de CO_2 equivalente (kg CO_{2e}). Ésta es la unidad de medida aceptada para determinar, de forma conjunta, el impacto que genera cada gas de efecto invernadero que emitimos a la atmósfera en el desarrollo de las actividades productivas, independientemente de cuál sea su objetivo final, un producto o un servicio.

3 Estudio de la huella de carbono de la ETSIT para la anualidad 2017

Para el cálculo de la huella de carbono de la ETSIT UPM se ha seguido la Norma ISO 14064, presentada en la sección 2.2.

En primer lugar es necesario establecer los límites organizativos del estudio: temporal, espacial y socioeconómico. El límite temporal del estudio es el año 2017. Respecto al límite espacial, el cálculo se realiza sobre la superficie construida a 31/12/2016, que es de 44.020,16 m^2, comprendido los 4 edificios de los que consta la Escuela [21]. Respecto a los límites socioeconómicos, se tiene en cuenta la población universitaria, que en el curso académico 2015-2016 constaba de 2654 alumnos, 269 PDI y 134 PAS, lo que supone un total de 3057 personas [22]. Concretamente, para el estudio realizado se ha considerado que todas las categorías indicadas tienen la misma contribución y responsabilidad en la huella de carbono, ya que es difícil distinguir el límite de la aportación de cada una de ellas.

Como se ha visto anteriormente, es necesario identificar las emisiones y clasificarlas por alcances. Según la Norma ISO 14064:1 los Alcances 1 y 2 son definidos con exactitud y de obligada contabilidad. Sin embargo, la inclusión de las emisiones de Alcance 3 es opcional para los inventarios de GEI. Por lo tanto, las emisiones consideradas en este estudio se clasifican de la siguiente manera:

- Alcance 1: emisiones directas de GEI. En este apartado se incluyen las emisiones derivadas del consumo de combustibles en instalaciones fijas o móviles dentro de los límites de la organización.
- Alcance 2: emisiones indirectas de GEI. Emisiones derivadas de la adquisición y consumo de energía en la organización pero producidas físicamente fuera de los límites de la misma. En nuestro caso, provenientes del consumo eléctrico.

Se han utilizado los datos disponibles para cada una de las actividades analizadas, si bien la base metodológica general para calcular las emisiones que se derivan de estas actividades es siempre la misma y consiste en aplicar la Ecuación 1, tal y como figura en la "Guía para el cálculo de la huella de carbono y para la elaboración de un plan de mejora de las organizaciones" publicada por el MAPAMA [23].

La Tabla 2 resume el cálculo de la huella de carbono realizado, mostrando tanto los valores por alcance como la suma de los dos alcances considerados.

El dato proporcionado por la suministradora del servicio de gas natural a la Administración de la ETSIT ha sido para la anualidad 2017 de 118.634 M^3. Dado que el gas natural tiene un factor de conversión de 11,70 KWH/M^3, el consumo de la ETSIT referente a gas natural para el año 2017 ha sido de 1.388.023,65 KW/h. El factor de emisión considerado para el gas natural procede del MAPAMA y es 0,203 Kg CO_2/KWH.

El consumo eléctrico en la ETSIT se debe principalmente a alumbrado, climatización y equipamientos. La información relativa al consumo de electricidad aportada por la Administración de la ETSIT ha sido para la anualidad 2017 de 3.901.418 KW/h. El factor de emisión utilizado ha sido el que ha aportado el suministrador del servicio y es 0,35 Kg CO2 /KWh

Tabla 2. Resumen de la huella de carbono de la ETSIT para la anualidad 2017

Alcance	Fuente emisión	Dato 2017 (KW/h)	Factor emisión (Kg CO_2/KWh)	HC (tCO_2)
Alcance 1	Gas natural	1.388.023,65	0,203	281,77
Alcance 2	Energía eléctrica	3.901.418	0,35	1365,49
Alcance 1 + 2				1647,26

Se observa que el impacto en la huella de carbono de la ETSIT que tiene el consumo eléctrico es muy superior al del consumo de gas. Es interesante también comparar los resultados obtenidos con los obtenidos en el estudio realizado por la ETSMFMN (Escuela pionera en actuaciones para mejorar el entorno y mitigar el cambio climático que fue la primera en obtener el Sello Calculo-Reduzco del Registro de Huella de Carbono del MAPAMA) en 2014. En dicho estudio se obtuvo que la huella de carbono de la ETSMFMN para los alcances 1 +2 en 2014 fue de 625 tCO_2, valor muy por debajo de las 1647,26 tCO_2 de la ETSIT en 2017. Sin embargo, si estos resultados se normalizan en base a la superficie construida y al número de personas, los valores obtenidos son bastante parejos (Tabla 3), si bien es cierto que no se tiene en cuenta que la ETSMFMN también compensa sus emisiones con un arboreto comprendido dentro de sus instalaciones.

Tabla 3. Comparación de la huella de carbono de la ETSIT en 2017 y la huella de carbono de la ETSMFMN en 2014 en términos absolutos y relativos

Escuela	Personas	Superficie (m^2)	HC A1+A2 abs. (t CO_2)	HC A1+A2 rel. (gCO_2/pax*m^2)
ETSIT	3057	44.020,16	1647,26	12,2
ETSMFMN	1565	33.051,36	625	12,0

4 Propuesta de mejora basada en datos de la plataforma Smart CEI Moncloa

Para estar en consonancia con la estrategia de sostenibilidad es necesario no sólo cuantificar la huella de carbono, sino también reducirla. Para ello, se deben desarrollar planes donde se propongan medidas para reducir las emisiones de GEI. Para disminuir las emisiones de GEI existen numerosas opciones, pero en este artículo nos vamos a centrar en cómo las TIC y nuevos paradigmas de comunicaciones en auge como el IoT pueden contribuir en este sentido.

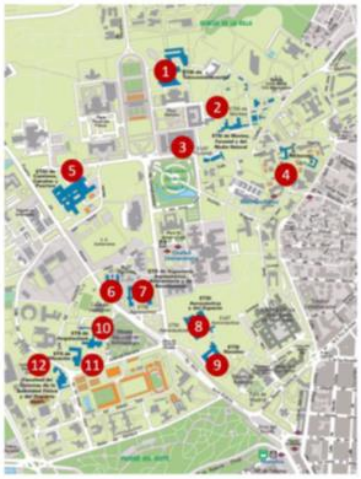
Concretamente, la UPM cuenta desde el año 2016 con la plataforma Smart CEI Moncloa, que representa uno de los principales resultados de la iniciativa *UPM City of the Future* [24]. Dicha iniciativa pretende fomentar actividades de formación, investigación, desarrollo e innovación en el área de *City Sciences*, con el objetivo de sacar partido al enorme potencial que ofrecen los equipos de investigación de la UPM para

abordar de manera integral los retos de la ciudad del futuro con un enfoque multidisciplinar.

La plataforma Smart CEI Moncloa es una plataforma IoT que actualmente ofrece servicios de monitorización de flujo de personas y monitorización de parámetros medioambientales (temperatura, humedad, luminosidad, ruido, CO y NO_2) [1].

La monitorización de flujo de personas se realiza mediante *Wi-Fi tracking*, para lo que se utilizan dispositivos de bajo coste basados en una *Raspberry Pi* y un *Wi-Fi dongle USB* de *TP-LINK* configurado en modo monitor. Estos sensores Wi-Fi escanean cada uno de los canales tanto en la banda de 2,4 GHz como en la banda de 5 GHz durante una cantidad de tiempo configurable (actualmente, 250 ms), leen las cabeceras de los paquetes IEEE 802.11 que capturan (tanto paquetes de datos como *probes*) y almacenan la dirección MAC del emisor anonimizada.

Por otra parte, para la monitorización de parámetros medioambientales se utiliza la plataforma de bajo coste SCK (*Smart Citizen Kit*) basada en Arduino. Como muestra la Fig. 4, actualmente hay 52 sensores Wi-Fi y 26 sensores medioambientales desplegados en las diferentes Escuelas de la UPM.



Grupo de Edificios	Número de sensores	
	WiFi	Ambientales
1. ETSI Telecomunicación	9	3
2. ETSI Montes	3	2
3. EUIT Forestales	3	2
4. Rectorado	4	2
5. ETSI de Caminos	3	2
6. EUI Agrícola	3	2
7. ETSI Agrónomos	5	2
8. ETSI Aeronáutica y del Espacio	5	2
9. ETSI Navales	3	2
10. ETS Arquitectura	4	-
11. ETS Edificación	2	2
12. INEF	3	2
13. ETSI Industriales	5	2
Total	52	26

Fig. 4. Sensores desplegados en la plataforma Smart CEI Moncloa

La Fig. 5 muestra los sensores Wi-Fi desplegados sólo en la ETSIT. La propuesta de mejora se va a centrar concretamente en la zona donde se encuentra el sensor "3. Std. Tables". Se trata de una zona con unos amplios ventanales y mesas donde los estudiantes pueden trabajar en grupo. En esa zona actualmente no se utiliza una tecnología de iluminación de bajo consumo ni inteligente. Por tanto, el estudio va a consistir en calcular la reducción en el consumo eléctrico asociado a esa zona y, por tanto, en la huella de carbono, que supondría sustituir la iluminación actual por otra de bajo consumo y que pueda controlarse para que sólo esté encendida cuando sea necesario (*i.e.*, cuando no haya suficiente luz y haya gente en esa zona). Para ello se dispone de los datos del sensor de luminosidad situado en el exterior de la Escuela y de los datos del sensor Wi-Fi "3. Std. Tables", ambos en formato CSV, para la anualidad 2017.

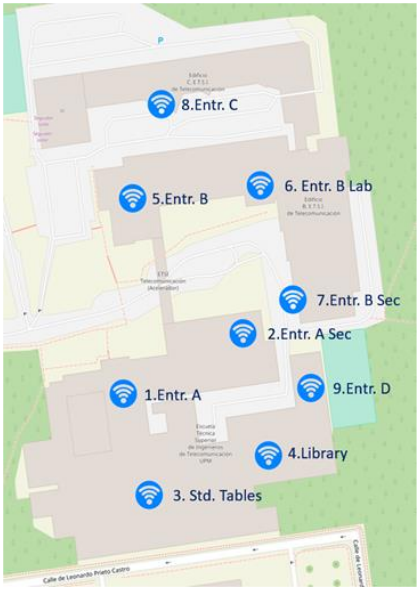


Fig. 5. Sensores Wi-Fi desplegados en la ETSIT

En cualquier caso, en primer lugar se va a calcular el ahorro en electricidad (y su impacto en la huella de carbono) que supondría usar una tecnología de iluminación de bajo consumo. En la zona de mesas considerada hay 40 focos con una potencia cada uno de ellos de 20W proporcionando 90 lúmenes, lo que, asumiendo que están encendidos de las 9 a las 21 horas, supone un consumo en dicha zona para una anualidad de 2.304 KW/h. Estos focos pueden ser sustituidos por LEDS de 2W proporcionando la misma luminosidad, lo que reduciría el consumo en esa zona hasta 230,4 KW/h al año, suponiendo un ahorro en consumo (y por tanto en huella de carbono) del 90%.

El coste de la inversión que supondría el cambio de tecnología, asumiendo que cada foco tiene un precio de mercado de 3,99 euros, sería de 159,6 €. Teniendo en cuenta que el precio de la luz en España en el año 2017 es de 0,12 € / KW/h, se obtendría una ROI (*Return On Investment*) del 57,98%.

En base a los datos procedentes de la plataforma Smart CEI Moncloa se puede aproximar, además, el número de horas al año en las que realmente es necesario tener la luz encendida. Como ya se ha comentado, los datos de los que se dispone son:

- Datos de iluminación, medidos en lux (lx)
- Datos de ocupación (personas que se encuentran en dicha zona)

Estos datos van asociados a una marca temporal o *timestamp* que se corresponde con la fecha y hora en la que se mide cada uno y las medidas se toman en intervalos de 15 minutos a lo largo de las 24 horas de cada día.

Para determinar cuándo hace falta que la luz esté encendida, primero se ha decidido un valor de umbral. Este valor corresponde con la cantidad mínima de luz que tiene que existir para que la visión sea correcta. Valores por debajo de este nivel, nos indican que

la visión no es la correcta y por lo tanto hay que encender la luz. El valor seleccionado es 4 lx, en base a [25].

Desde la plataforma se han obtenido dos columnas en formato CSV que contienen los datos de luminosidad y ocupación y se han importado a unas hojas de cálculo Excel. A continuación se ha realizado, por una parte, un filtrado de todos los valores de iluminación menores que el valor de umbral en la franja horaria comprendida entre las 9,00 y las 21,00 horas. Posteriormente, se han comparado esos intervalos con los datos de ocupación, comprobándose que los intervalos en los que la luz cae por debajo del umbral se corresponden con momentos en los que hay mínimo una persona en la zona, .por lo que no se puede mantener la luz apagada en ninguno de esos intervalos (aunque sí en el resto).

Como se ha comentado anteriormente, cada intervalo corresponde a 15 minutos. El número total de intervalos que cumplen que el valor de umbral es menor al umbral establecido y existe ocupación es de 6.480, lo que supone 1.620 horas al año en las que es necesario encender la luz. Esto supone una reducción de consumo adicional, dejando el consumo anual de esa zona en 129,6 KW/h.

En consecuencia, con un cambio de tecnología y con la utilización correcta del encendido y apagado de las luces, el ahorro energético y de contribución a la huella de carbono es del 94,375%.

5 Conclusiones y trabajos futuros

El impacto medioambiental de las organizaciones es un tema especialmente relevante hoy en día. La Universidad juega un papel importante en este ámbito ya que puede tanto investigar en cómo reducirlo como formar a nuevos profesionales proporcionándoles herramientas para hacerlo. Las TICs, en general, y las plataformas IoT y técnicas de *Big Data*, en particular, pueden ser de gran utilidad en este sentido.

En este artículo se ha presentado el cálculo de la huella de carbono de la ETSIT de la UPM en la anualidad 2017 en base a la Norma ISO 14064. Además, se ha realizado una propuesta concreta para reducir el consumo eléctrico y la huella de carbono en una zona determinada de la Escuela cambiando la tecnología de iluminación y controlando que la luz esté encendida sólo cuando haga falta en base a los datos de luminosidad y presencia recolectados por la plataforma Smart CEI Moncloa.

Como trabajo futuro, se plantean realizar propuestas de mejora similares aplicadas a otras zonas de la ETSIT o de otras Escuelas del Campus de Moncloa de la UPM, ya que, como se ha indicado en el artículo, la plataforma Smart CEI Moncloa cuenta con sensores desplegados en todas ellas.

Agradecimientos

Este trabajo ha contado con el apoyo de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM) a través del programa “XVIII Convocatoria para Acciones para contribuir al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)”, del Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED) a través de la red CITIES

(518RT0557) y de la Subdirección de Asuntos Económicos e Infraestructuras de la ETSIT de la UPM. Los autores quieren expresar su agradecimiento al Prof. Lorenzo J. Martín García, Subdirector de Asuntos Económicos e Infraestructuras de la ETSIT, así como a Luis Luengo e Ignacio Morenos, por haber proporcionado los datos de consumo de la Escuela necesarios para la realización de este estudio.

Bibliografía

1. Alvarez-Campana, M., *et al*., Smart CEI Moncloa: An IoT-based Platform for People Flow and Environmental Monitoring on a Smart University Campus, *Sensors*, 17(12), (2017). *Online*: http://www.mdpi.com/1424-8220/17/12/2856 , último acceso 13/07/2018
2. IPCC, 2014. Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo principal de redacción, R.K. Pachauri y L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 157 págs.
3. WEF, 2017. The global Risks. Report 2017 12th Edition (GRR17_Report_web). Recuperado de: http://www3.weforum.org/docs/GRR17_Report_web.pdf, último acceso 15/07/2018
4. ONU, 2018. Objetivos de Desarrollo Sostenible. https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/, último acceso 15/07/2018
5. Parrado, A. & Trujillo, H. 2015. Universidad y Sostenibilidad: Una Aproximación teórica para su implementación. AD-minister.
6. GreenMetric. 2016. Overall Rankings 2016. UI GreenMetric World University Rankings. Recuperado de: http://greenmetric.ui.ac.id/overall-ranking-2016/ último acceso 15/07/2018
7. Alba, D. & Ysern, P. (2011). Evaluación de las políticas universitarias de sostenibilidad como facilitadoras para el desarrollo de los campus de excelencia internacional. Estudio financiado por el Programa de estudios y análisis destinados a la mejora de la calidad de la enseñanza y de actividades del profesorado universitario de 2010. Ministerio de Educación.
8. CRUE, 2015. Conferencia de Rectores de las Universidades Españolas. Recuperado de: http://www.crue.org/SitePages/Inicio.aspx, último acceso 15/07/2018
9. MECD. (2017b). Programa Campus de Excelencia Internacional. Ministerio de Educación, Cultura y Deporte. Recuperado de: https://www.mecd.gob.es/servicios-al-ciudadano-mecd/catalogo/general/educacion/0/cei/cei-2009.html, último acceso 15/07/2018
10. MECD. (2017a). Estrategia Universidad 2015. Contribución de las universidades al progreso socioeconómico español 2010-2015. Ministerio de Educación, Cultura y Deporte.
11. Wiedmann, T. y Minx, J. 2007. A definition of carbon footprint. En: C. C. Pertsova, Ecological Economics Research Trends. Chapter 1, pp. 1-11, Nova Science Publishers, Hauppauge NY, USA.
12. World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) and World Resources Institute (WRI), 2004. A Corporate Accounting and Reporting Standard. World Business Council for Sustainable Development and World Resources Institute. USA.
13. Espíndola, C. y Valderrama, J.O. 2012. Huella del Carbono. Parte 1: Conceptos, Métodos de Estimación y Complejidades Metodológicas. Información tecnológica. Vol.23, n. 1., pp. 163-176. La Serena. Chile.
14. UPM. 2017. Campus de Excelencia Internacional: Campus Moncloa. Universidad Politécnica de Madrid. Recuperado de: http://www.upm.es/Investigacion/personal_estructuras_inv/Campus_de_Excelencia_Internacional/CampusMoncloa, último acceso 15/07/2018

15. Rodríguez-Olalla. A 2015.La huella de carbono en la sostenibilidad empresarial. En S. Álvarez Gallego (Eds.), *conceptos básicos de la huella de carbono* (79-88). Madrid. AENOR Ediciones
16. Rollán, H. 2013. Inventario de emisiones de gases de efecto invernadero en las organizaciones: aplicación de la Norma ISO 14064. Proyecto fin de carrera de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes. Universidad Politécnica de Madrid.
17. Comisión Europea, 2010a. Company GHG Emissions. A Study on Methods and Initiatives. Environmental Resources Management. Manchester. Reino Unido.
18. Rodríguez-Olalla. A y Álvarez, S 2015.*La huella de carbono de las organizaciones*. Madrid. AENOR Ediciones
19. AENOR. 2009. Mecanismos para la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. Protocolo de Kioto. AENOR Ediciones. España.
20. Rodríguez, C. 2015. La gestión de las emisiones de gases de efecto invernadero como parte de la estrategia de sostenibilidad de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Montes, Forestal y Medio Natural. Universidad Politécnica de Madrid.
21. Portal de transparencia de la UPM: Inmovilizado material. Superficies a 31/12/2016: http://www.upm.es/transparencia/informacion_economica/relacion_bienes_inmuebles?id=4e3891b5a650f510VgnVCM10000009c7648a____&fmt=detail&prefmt=articulo, último acceso 15/07/2018
22. Portal de transparencia de la UPM.: Infraestructuras y recursos de la ETSIT UPM. Alumnos matriculados ETSIT UPM año 2015/2016 y personal docente: http://www.upm.es/transparencia/estudiantes/matriculados_titulo, último acceso 15/07/2018
23. Guía para el cálculo de la Huella de Carbono y para la elaboración de un plan de mejora de las organizaciones publicada por el MAPAMA: http://www.mapama.gob.es/es/cambio-climatico/temas/mitigacion-politicas-y-medidas/guia_huella_carbono_tcm30-178893.pdf, último acceso 15/07/2018
24. UPM *City of the Future*, http://blogs.upm.es/cityofthefuture-upm/en/initiative/, último acceso 13/07/2018
25. Niveles de iluminación recomendados: https://www.noao.edu/education/QLTkit/es/Safety_Activity_Poster/LightLevels_outdoor+indoor_es.pdf, último acceso 13/07/2018

Libelium technologies and successful use cases in the context of Internet of Things for Smart Cities.

Juan Perrela Clavería[1]

[1] Libelium Comunicaciones Distribuidas S.L
j.perrela@libelium.com

Abstract.
Report on the technologies developed by Libelium with applications in the context of a smart city, such as Waspmote Plug&Sense! in three of its variants (Smart Cities PRO, Smart Environment PRO and Smart Water), Smart Parking and Meshlium. Each product description is followed by a use case where the features of each product have been tested and validated, solving the existing problems in each case.

Keywords: IoT, sensor, cities

1 Introduction

1.1 Presentation of Libelium

Libelium [1] is a Spanish company, constituted in November 2006, with fully Aragonese capital, known as a leading technological company. Its activity consists in designing and manufacturing hardware devices to build wireless sensor networks for the Internet of Things. The applications of its technology are within the frameworks of Smart Cities, Precision Agriculture, Smart Water and Environment Management, and many other purposes with the goal of improving the quality of life of the people.

The wireless sensor platform "Waspmote", designed by the engineering team of Libelium, has the distinction of being the only modular and open source platform in the market, in which it is possible to integrate any kind of storage and processing cloud platform, and through any wireless communication protocol. This feature gives the sensor platform versatility, making it compatible with any IoT project in which a sensor needs to be connected wireless to the internet.

Libelium technology is helping to overcome the great challenges of mankind in the 21st century, such as the improvement of crops, the sustainable management of natural resources, the fight against climate change, remote medical assistance, etc. Libelium technology is present in over 120 countries in real projects that we have developed all around the world, thus contributing to improve its sustainability.

1.2 Motivation for IoT devices on Smart Cities

Nowadays urban areas are growing quickly, and consequently their demand of resources and services. Managing the available resources in an efficient way is becoming harder and at the same time more important every day. Internet of Things (IoT) and its complementary technologies have the potential of making this task much easier and cheaper in some critical areas such as traffic, pollution and parking control or water and people management.

IoT enables a way to perform data acquisition for pollution and traffic evaluation in a cheap, reliable and remote way. Ten minutes searching for car parking several times daily means more than 10 complete days per year, and driving around looking for an available car slot wastes fuel, produces anxiety and increases pollution in urban areas, furthermore the traffic can increase between 8 and 74 percent [2]. The use of parking control systems or traffic detection could solve these problems as well as reduce the energy consumption in urban areas about 10 percent [3]. Moreover, the installation in our cities of other kind of sensors, such as air and water quality or scanners for people counting, also makes cities safer, anticipating health or public safety risks [4].

Finally, the lowering costs of IoT measurement devices and infrastructures allows a higher spreading of the measure points, giving this way a more accurate and overall

perspective of the city problems and allowing to solve them more effectively. In this way, quality of life in cities increases and cities become more attractive, sustainable and responsive.

2 Libelium Technologies and Use Cases for Smart Cities

2.1 Waspmote Plug&Sense! - Platform overview

The Waspmote Plug & Sense! (Fig. 1) line [5] allows you to easily deploy Internet of Things networks, ensuring minimum maintenance costs. The platform consists of a robust waterproof enclosure with specific external sockets to connect the sensors, the solar panel, the antenna and even the USB cable in order to reprogram the node. It has been specially designed to be scalable, easy to deploy and maintain.



Fig. 1. Waspmote Plug&Sense!

2.2 Waspmote Plug&Sense! - Smart Cities PRO

The main applications for this Waspmote Plug & Sense! model are noise maps (monitor in real time the acoustic levels in the streets of a city [LeqA in dBA]), air quality, waste management, smart lighting, etc.

Use case: Air quality application based on IoT unites technology and healthy lifestyle.

BeitMisk [6] is a private community located in a beautiful natural setting that enjoys a good environment with clean air quality. One of the main objectives of the ideologists of this new city was to guarantee the quality of the air and to offer this information to the tenants in a smart way.

On the hills and with sea views, twenty minutes away from Beirut, is located BeitMisk residential area. This new city concept joins self-sufficiency with ecology. Its green areas represent 80% of the district with more than 200,000 new trees, irrigated with recycled rainfall water.

Data Consult [7], Lebanese company established in 1991, is known for providing avant-garde integrated solutions, managed services, solution design, that help its clients maintain business sustainability. With over 150 highly skilled professionals, Data Consult successfully proved its technical prowess in digital innovation.

Recently the company embarked on a new adventure, launching the first smart city in Lebanon developed with Libelium's technology. The project includes digitizing of the physical elements of the city, adding a layer of machine learning and artificial intelligence to provide data insights and predictive analytics. This deployment allows tenants and facility management teams to connect with their city through various intuitive communication tools, save on resources and enjoy a better citizen experience.

BeitMisk management offers an exclusive and exceptional living experience, associating technology with a healthy lifestyle. Data Consult is the company in charge of developing the new sensor network and the software application related.

Libelium environmental and AQI wireless sensors were installed by Data Consult throughout the residential area to bring more awareness to the environment, bringing the users the possibility to know when it is the best time of day for children to play outside or when is a good time to plan an outdoor activity.

BeitMisk usually hosts recreational events such as concerts, film festivals or lunch meetings. For the village's management, all this information permits to better plan any activity, project or construction without increasing the air pollution.

Additionally, having this data also helps to add proper air filters to power generators and in maintaining a better control of traffic within the community, creating an environmentally friendly awareness among neighbours.

Data Consult installed several Waspmote Plug & Sense! Smart Environment PRO to measure the following air quality parameters: Temperature, humidity, atmospheric pressure, carbon monoxide (CO), nitrogen dioxide (NO2) sulphur dioxide (SO2) ozone (O3) and particle matter (PM1, PM2.5, PM10)

In Fig. 2 is shown the diagram of BeitMisk Smart City Project: The nodes use LoRaWAN communication protocol to have the data sent to the LoRaWAN Gateways, which were part of the Ogero [8] nationwide Internet of Things network. The gateways are linked to the Google Cloud and hooked to a platform and an application server built by Data Consult, where it is collected, processed with machine learning and finally displayed. An intelligence layer was added to provide insights and predictive analytics that allow for a better decision making process.

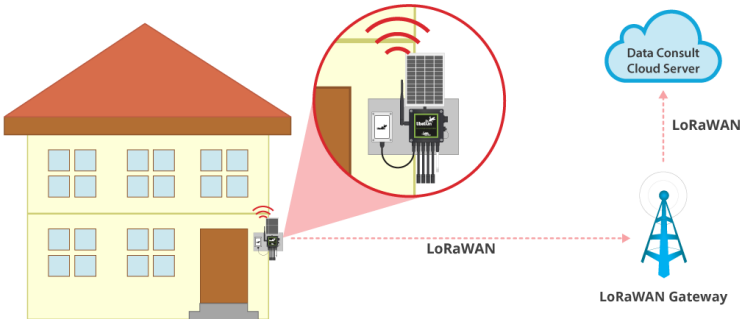


Fig. 2. Diagram of BeitMisk Smart City Project

Users experience the product through the interface provided, so information can be accessed in three different ways depending on the reader:

- The facility management: through a web dashboard.
- Tenants: through mobile application.
- Other tenants can contact the chat bot.

The reasons for Data Consult to choose Libelium Sensor Platform reside in the versatility of the Waspmote sensor platform, which offers an integrated solution, with solar powered devices, calibrated sensors and LoRaWAN connectivity.

Additionally, Data Consult also highlights that installing and running the project in a short period of time has a positive impact on the overall smart enhancements the city is planning to deploy.

Marc Nader, Chief Operating Officer of Data Consult, who led the company's transformation towards managed services, cloud and IoT declared that "working with Libelium on this project was a very positive experience. The combination of LoRaWAN and solar power made it very easy to install with minimal intrusion on the customer's environment. It was working perfectly ever since, data is flowing into the platform continuously without a single maintenance operation. It's a precise and reliable product. The users were extremely happy to have this real-time data available".

Use case: Athens International Airport trusts EXM and Libelium's IoT platform to enhance environmental monitoring.

Athens International Airport (AIA) [9], in Greece, has increased the number of passengers by more than 10% in the last year. Approximately 20 million passengers went through its gates in 2016, setting a new traffic record for Athens. The airport has a strong commitment to environmental protection; it is the first airport in Greece to become carbon neutral.

AIA's commitment to environmental protection goes hand in hand with innovation. That's why in 2016, the airport partnered with a Greek company specialized in IoT prediction analytics and IoT solutions, Ex Machina [10] in order to explore innovative IoT solutions to enrich AIA's environmental monitoring, analysis and reporting. Libelium's technology was utilized for the hardware sensors part of this project. Eight Waspmote Plug & Sense! Smart Cities, three Waspmote Plug & Sense! Environment PRO using GPRS and LoRa communications together with Meshlium IoT gateways using LoRa and 3G communications compose the infield hardware of the solution.

The aim of this project was to face two demanding challenges: the need to monitor air quality outside the airport fence and the need to determine aircraft location on the airfield.

Ad-hoc air quality monitoring

The first challenge involved the monitoring and analysis of air pollutant concentrations, such as Ozone (O3) and Particulate Matter (PM1, PM2.5, PM10). Ex Machina focused on the need for an inexpensive, highly portable, stand-alone, connected air pollution monitoring device to complement AIA's existing air quality monitoring network. The solution is based on Libelium Waspmote Plug & Sense! Sensor Platform, and is comprised of cost-effective, standard hardware assembly with EXM´s custom firmware. Each sensor node is equipped with probes for temperature, humidity, atmospheric pressure, ozone and particulate matter.

Additionally, throughout the project it was possible to evaluate Libelium's air quality sensors accuracy, taking advantage of the highly portable/compact and energy autonomous approach of the Waspmote Plug & Sense! model. Finally the LoRa communication characteristics, in terms of range, security and energy consumption were also evaluated.

Air quality monitoring solution based on Waspmote Plug & Sense! and Meshlium Gateways Air quality monitoring solution based on Waspmote Plug & Sense! and Meshlium Gateways

Aircraft location on the airfield

The second challenge was to detect aircraft location in the airfield during take off with a non-intrusive mechanism. To address this challenge, Ex Machina decided to utilize acoustic localization techniques. This unusual, yet innovative approach is possibly world's first implementation in using noise sensors to determine aircraft location on the airfield.

The noise data collected is analysed in the EXM IoT backend, in order to be correlated with various additional information, such as airplane types/flights/airlines. Through the combined analysis of the acquired data, the location of aircraft can be identified and reported to the airport's environmental department for further statistical analysis, thus enhancing its environmental monitoring capabilities. Fig. 3 shows the Environmental Monitoring Dashboards of Ex Machina IoT Platform.



Fig. 3. Environmental monitoring dashboards of Ex Machina IoT Platform

In this, various IoT PaaS options were integrated with Meshlium and were evaluated, such as Microsoft Azure, IBM Bluemix and Sentilo.io which all provided a good fit for the project requirements. Final solution was a mix of Microsoft Azure services combined with EXM's components built on open source IoT frameworks/systems including NodeRED, Grafana and InfluxDB. This approach provided the maximum flexibility and extensibility as it was required.

Libelium's Waspmote Plug & Sense! devices send the sensor data using LoRa communications for low power, low range, real time sensor data transmission and device control/orchestration. For secure device management, Over the Air firmware upgrades (FOTA), configuration of firmware parameters and thresholds and the bulk upload of sensor data as backup, the sensor platform uses GPRS communications.

Ex Machina's decision to trust Libelium's open-source technologies provides maximum flexibility to its end customers avoiding vendor lock-in, being protocol agnostic and at the same time secure, robust and scalable solutions. The use of open technologies to build the solution increases flexibility and transparency, enabling at the same time full access to raw data.

2.3 Waspmote Plug&Sense! - Smart Environment PRO

Smart Environment PRO enables the Air Quality Index (AQI) calculation, thanks to 16 gas sensors providing extremely accurate ppm values and a high-end Particle Matter sensor.

Use case: The city of Tilburg (NL) becomes smart and sustainable teaming with Libelium and Ericsson to develop an IoT environmental control platform.

The Council of the Dutch city of Tilburg aimed at checking the environmental status related with water, air quality and noise pollution, has trusted Ericsson and Libelium to set up an IoT platform around the area of Piushaven [11], in the city centre, to control and manage the environmental data.

Ericsson [12], a global leader in delivering ICT solutions, uniquely delivers IoT capabilities from world-leading connectivity to award-winning industrial-IoT applications. The company has partnered Libelium in order to deploy a complete wireless sensor network to measure different parameters related to air and water.

Air, water and noise level sensors

Libelium's sensor network which has been deployed in Piushaven is composed of five Waspmote Plug & Sense! Smart Environment devices, one of them to measure temperature, humidity and pressure, three other sensors to measure Carbon Dioxide (CO2), Nitric Dioxide (NO2), Ozone (O3) and one more, a Dust Sensor, to measure the Particle Matter.

Regarding water quality measurement, the network includes two Waspmote Plug & Sense! Smart Water sensors. One of them will collect information on water pH and the other one on Conductivity. In this case, three different calibration kits are included.

In order to measure sound levels, two Waspmote Plug & Sense! Smart City sensors were installed. One of them consists of a microphone and the other one is an Ultrasound probe. Libelium's Noise Level Sensor measures the parameter LAeq (Equivalent Continuous Sound Level, with A-type weighting), in dBA units. LAeq is the most frequently used parameter for noise measurements. It is now used by most countries as the metric of choice for measuring the exposure of workers to noise, as there is no time constant and it correlates reasonably well to the effect of hearing damage risk. It is common practice to measure noise levels using the A-weighting setting built into all sound level meters.

A Meshlium Gateway [13], the Meshlium Scanner 802.15.4-PRO-AP completes the network elements to detect the MAC address of smartphones, hands free and cars by scanning WiFi signals.

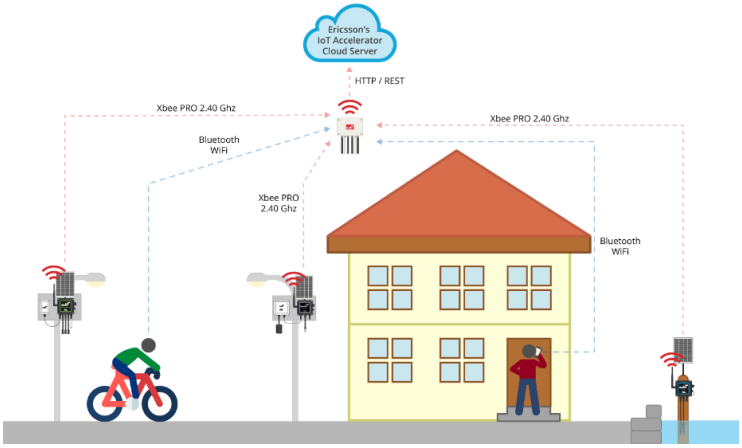


Fig. 4. Diagram of Tilburg's network

The communication among the different elements of the network takes place according to different protocols. Communication between the devices and the IoT gateway is carried out by an XBee-PRO working in the 2.4 GHz band. Between the gateway and the cloud the communication to download data periodically goes through Wi-Fi and Ethernet connection to the local database.

All the collected data is analysed in the cloud using Ericsson's IoT Accelerator platform and visualized through a dashboard made to fit customer needs. In fact, the main requirement is to check the environmental status of the water standards, the air quality and the sound levels measured to be visualized on a public website. **Fig. 4** shows the diagram of Tilburg's network.

The goal of the project is to provide an open platform where city environmental quality can be monitored. Via analytics tools, Ericsson's IoT Accelerator platform combines all measured data so new insights can be revealed. The ultimate goal is to have a predictive system to forecast people movements passing by (by foot, bike or car) depending on, for instance, the weather conditions and to indicate what impact will produce to the sound levels on the zone.

Besides, as the city celebrates many events in and on the water, the system also provides a continuous monitoring of the water quality to give more insight as input for those events (like diving, swimming and rowing races).

Although periodical checking of air and water quality is relevant to citizens, the key point of this project is sound level monitoring, which can be used to comply to the legal thresholds. When complaints are received, the Council can glance at the real sound levels instead of having to go there to measure it. This is where the most remarkable part of return of investment lies as well as when big amounts of data are collected and can be correlated with each other.

Quickness to find solutions

The City of Tilburg benefits from sensor data in two different ways: citizens and visitors can experience a clean and healthy environment and the Tilburg government provides access to real-time air and water quality data to demonstrates the commitment to their citizens. “Those living in the Piushaven neighborhood can stay informed about living conditions through the Smart Tilburg Dashboard. Additionally, Tilburg uses the data collected from sensors to create efficiencies in the way they work. Tilburg technicians no longer needs to be onsite in this neighborhood to test water and air quality or sound pollution. When complaints come in Tilburg Council can check the dashboard for real-time sound levels and with this data at their fingertips, can also reduce delays in response time”, Mark Damen, Innovation & IoT driver at Ericsson, states.

Use case: Libelium’s IoT sensors platform helps to control environmental impact on Palma de Mallorca’s harbor to become a smart tourist destination.

In Palma de Mallorca, massive arrival of ships and tourists endangers the island’s environmental balance. Authorities are trying to prevent its impact from having a negative effect on life conditions in Mallorca, which is betting on becoming a smart and sustainable tourist destination.

Becoming Smart Destinations

To do so, Mallorcawifi.com [14] has opted for Libelium’s technology in the project developed for the Balearic Harbours Authority (APB in Spanish) [15]. In this way, Mallorcawifi.com has deployed a wireless sensor platform aimed at measuring environmental impact not only of cruisers docking, but also of the whole harbour’s activity.

A multidisciplinary research team from University of the Balearic Islands (UIB in Spanish) [16] is also involved in the project. This team will analyse the results obtained by the sensors net in order to correlate air pollution and noise pollution levels with the activity generated in the harbour, and the way it affects the city. Everything is aimed at making decisions on the harbour’s environmental behaviour and improving the conditions so that tourists and island inhabitants can enjoy a healthier city.

Balearic harbours managed by APB are ranked in the third place in the number of cruise passengers -almost two million- and are the second in the number of registered layovers, led by Italian Civitavecchia harbour.

However, not only cruisers dock in Palma de Mallorca’s harbor. In 2016, according to APB 3,031 ships arrived at any of the Balearic harbours. Those ships brought 2.5 million passengers and more than 8.2 million tons of goods. According to a study by the Balearic Business Associations Confederation (CAEB in Spanish) and the International University of the Balearic Islands, the economic impact of Balearic

harbours is 290 million euros directly on the touristic sector companies and 146 million euros of indirect economic impact. The sector creates 3,000 new employments every year.

Air pollution and noise measurement

The return of investment of an IoT project to improve sustainability is really easy to reach because any measure taken to increase tourists' wellness has a positive effect on destination's relevance and attracts higher economic power passengers. As a matter of fact, these passengers search for experiences which enable them to mix urban tourism, nature, gastronomy and interaction with the area inhabitants.



Fig. 5. Sensor Platforms installed in Portopi Lighthouse

The project deployed in the city of Palma measures two basic environmental parameters which most affect on citizens' health: air quality and noise. To do so, the project contemplates to place a total of 27 Waspmote Plug & Sense! Smart Environment PRO in different locations around Palma's harbour, and 5 Waspmote Plug & Sense! Smart Cities. Those devices collect the data provided by 81 sensors measuring, among other aspects, carbon dioxide, sulphur dioxide, ozone, noise, temperature, humidity, air pressure, wind and rainfalls.

In the first stage of the project eight devices have been placed in the Dique del Oeste, the signals tower and Portopí lighthouse (Fig. 5), Maritime Station nr. 3, Can Barbarà, Sa Qarentena park, Mollet opposite pier, commercial piers, and the APB historical venue, next to Palma de Mallorca's cathedral. APB intends to spread this experience to the rest of Balearic harbours.

Sigfox [17] is the protocol which has been used to communicate the data collected by the sensors. Iqmenic, created by Nexmachina, is the wireless platform for management and control of communications among sensors and IP devices to deploy new IoT services.

"The wide range of high accuracy sensors, fulfilling all our needs, as well as the ease of their deployment make Libelium's sensors the perfect solution to this project", states Mauricio Socias, Mallorcawifi.com's CEO, who is "completely satisfied" with the work done by Libelium's staff.

2.4 Waspmote Plug&Sense! – Smart Water

Smart Water allows to monitor water quality parameters in rivers, lakes, the sea or any other location.

Use case: Getaria: environment monitoring for a smart tourist destination.

Getaria [18] is a tourist destination of the Basque Coast in the North of Spain which has increased tourism volume in recent years. The council is searching for recognition as smart and sustainable tourism destination through an environment monitoring project linked to the public wireless network.

Getaria has a wireless WiFi/Wimax network that is ready to provide free public Internet access in different districts of the town and can also be used to self-provision other internal services for the city hall itself. This wireless network, combined with Sigfox network, has been improved to add new IoT services to citizens.

The project includes a technological platform used to collect, integrate, store and analyse municipality information with a global perspective. Between the public services that the project is monitoring figures the environmental control of air, noise and water in real time to increase citizens welfare and to prevent problems that can cause a negative impact on the tourism attraction.

Regarding water quality measurement, the objective of the Council is to control any spills on the public supply that can affect water quality to two main beaches, the port and rainwater locations. For that, our Waspmote Plug & Sense! Smart Water solution has been installed. In this case, the sensors used are: pH sensor, Conductivity sensor and Oxidation-Reduction Potential (ORP).

The network also includes two air quality monitoring systems to ensure that pollution levels are adjusted to European standards and to monitor areas at risk of emissions from the largest concentration of tourism using means of transport that emit CO, NO2, O3, SO2 and harmful particles. In fact, Libelium Plug & Sense! Smart

Environment PRO enables the Air Quality Index (AQI) calculation, thanks to 16 gas sensors providing extremely accurate ppm values and a high-end Particle Matter sensor.

The Spanish company, Nexmachina Solutions [19], has developed this project with Libelium technology. iQmenic is the Nexmachina's platform for monitoring and managing wireless sensor networks communications and IP devices to deploy new IoT services. It is shown in **Fig**. 6

Nexmachina combines Libelium Waspmote Plug & Sense! Sensor platform with the cloud platform iQmenic under an "all included" solution. "Working with Libelium has enabled us to launch a new business model for our customers -cities, towns and industries- providing them a solution that includes value added proposal and operational costs control", says Fernando Presa, CEO at Nexmachina.



Fig. 6. iQmenic platform

Nexmachina consider that Libelium technology provides customers the best devices compatible with all type of wireless communication protocols. "Flexible, strong, autonomous, calibrated and real time sensing solution" is the definition that Fernando Presa appoints to Libelium sensor technology. Besides, he remarks that users are very satisfied because the solution offered can grow at the rate of their requirements.

ROI in tourism impact

The recognition of the city as smart resort on the Costa Basque, will provide an increase in visitors which will result in a positive impact on trade, hotels and restaurants establishments in the municipality. In 2015, the Tourism Office at Getaria registered a total volume of 35,748 visitors coming from Spain, France, UK and USA. In the next two years is expected an increase in the volume of tourists around 5,000 people to exceed 40,000 visitors annually.

The recorded data will be posted on the municipal website. The council will deploy an action plan from the decision-making system based on environmental data registered. Thus, when noise levels or water quality may not be appropriate, they may take action against those responsible. And when the sensors detect that the air quality worsens by CO2 emissions, traffic diversions can plan and enable park and ride for tourists in high season.

2.5 Smart Parking

Smart Parking [20] allows citizens and administrations to detect available parking spots.

Use case: Smart Parking project in Montpellier to relieve traffic congestion and reduce car parking search.

Montpellier [21] is a small French city of the region of Occitanie. Its 270,000 inhabitants suffer, as in every other city, from traffic jams and lack of available parking slots. This city has historically been pioneer in smart cities projects related to mobility at first stage and moving to larger IoT deployments nowadays.

Montpellier Mediterranean Metropolis (Montpellier Méditerranée Métropole in French) [22] is the public intercommunal structure which promotes all these IoT projects thanks to its commitment to the "Open Data" solutions to enrich the services offered to the citizens.

With its 10 years experience, the French company Synox [23] has shared all its knowledge and know-how to Montpellier Mediterranean Metropolis with new and innovative urban services and particularly a smart parking solution, developed with Libelium's technology, named "Connected Parking".

Synox, who is customer of Libelium's official distributor Factory Systemes [24], is actively involved in smart cities projects since its foundation due to the fact that its mission aims to contribute to the development of urban services thanks to the new technologies. Some months ago, the company won a public tender of the Montpellier Mediterranean Metropolis which gave Synox the opportunity to benefit from a wide range of projects, involving inter alia different companies, start-ups, laboratories and universities.

Along with the creation of this large-scale smart cities project, the Montpellier Mediterranean Metropolis set the stages for a private network based on LoRaWAN communication protocol. Some LoRaWAN antennas were installed by the company Synox in strategic locations on the urban area in order to give coverage to the upcoming smart cities projects.

Montpellier shopping centre has limited parking slots and there are traffic jams in some streets habitually. The main goal of this project was to make traffic more fluid and increase rotation at parking spaces near the town hall and a shopping centre.

Twenty Smart Parking nodes were installed by Synox in two different areas of the city: six at the surroundings of the Montpellier Town Hall (Hôtel de Ville de Montpellier) and the rest on the nearby Parc Marianne district.

These devices were installed in the surface of the roadway on the parking areas for people with reduced mobility and delivery services with the aim to relieve congestion, streamline traffic, and improve access to car park areas. In the future, more people will benefit from this project since it is planned to enlarge the quantity of nodes throughout the territory of the metropolis.

Besides, sensors also gather data about the temperature of the roadway which will be used by the metropolis road authorities to take action in case of the presence of ice sheets.

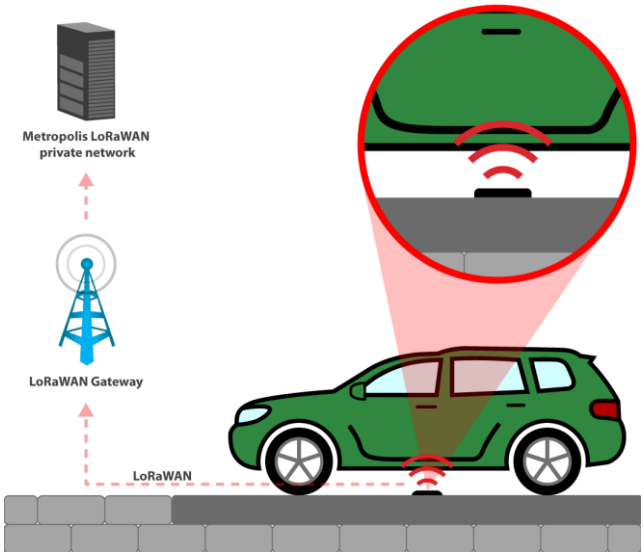


Fig. 7. Diagram of Connected Parking project

The Smart Parking sensor network (Fig. 7) is connected to the Metropolis LoRaWAN private network which has been deployed thanks to the expertise provided by Synox, who has built a specific infrastructure to allow the entity to keep sovereignty in the data from end to end. Data management displays show this real-time information and indicators of the use of car parking slots in order to improve the traffic conditions and diminish car parking search time.

"Connected Parking" as part of the "Open Data" approach helps citizens to have more information and on-line data available. Users, laboratories and other start-ups can use this data and benefit from it, creating new services for smarter, more dynamic and environmentally friendly city.

2.6 Meshlium SmartPhone Detection

Meshlium [13] is the IoT gateway developed by Libelium to connect any sensor to any cloud platform, has also detection capabilities for Bluetooth and wifi devices [25], allowing this way the performance of statistical estimations of people or cars, for example.

Use case: Smartphone detection scanner to identify volume of visitors and behaviours in United Kingdom trade fair.

The "Bolton Food and Drink Festival" [26] is celebrated every summer in the town of Bolton, located in Greater Manchester (United Kingdom). It is an event which unites different flavours and tastes from all over the world. The last gathering, in summer 2017, broke records again with more than 267,000 visitors. The organization requires control over the presence and behaviour of the attendants.

Innotech Concepts [27] was selected by the festival organizers to manage a project to monitor visitors data. The start-up specializes in transport, events and urban data collection with a focus on connectivity, public safety and evacuation.

Innotech Concepts chose Libelium's Meshlium Scanner to deploy this project at the Bolton Food and Drink Festival. Scanning WiFi and Bluetooth devices in the festival area allowed the organizers to study the demand and conduct of the visitors in real-time.

The organizers needed to know the volume of visitors at three key locations including length of stay and individual journey routes between the festival and local car transport and car parks. The main goal was to create an off-grid solution that could be rapidly deployed as well as being lithium powered. Once deployed, the system scans individuals upon entry and exit.

Two Meshlium Scanner units were installed at the main entrances of the fair and a third device was installed in one of the car parks and local transport parking zones (as it is shown in Fig. 8), scanning devices via WiFi and Bluetooth every 15 minutes.

The main criteria for analysis were:

- Duration of stay.
- Visitor volume per location.
- Visitor volume per day.
- Most popular locations.
- Most popular individual and group routes.
- Total project visitors.

The anonymous data was securely sent via 4G to the proprietary analysis platform, a software specially developed for modelling pedestrians called Innotech Insights Crowded™. The data is electronically analysed and visual charts are provided alongside the raw data. Additionally, the platform also provides a raw data download option so that the customer has access to the raw data set. This means that a customer can perform their own calculations with the data and also show that the technology and its analysis is transparent, open and honest.

Crowded™ platform is able to process data from hundreds of projects anywhere in the world, and it is provided for both temporary and permanent installations. It includes a fully automated analysis service that provides the end-user with accurate visualizations based on projected pedestrian movements. The system can analyse data from an unlimited number of scanners for an unlimited project duration, which will allow the technology to transcend temporary study applications and support permanent smart city infrastructures.

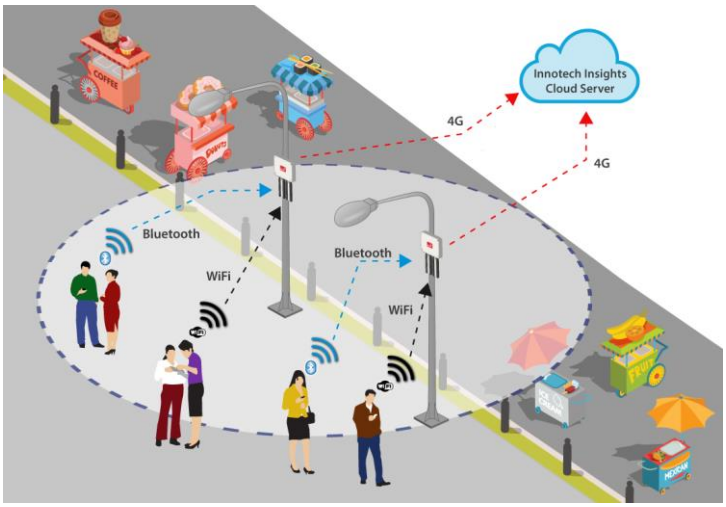


Fig. 8. Diagram of the installation at Bolton city center

Furthermore, the platform can incorporate emissions and other pollutant monitoring related to Smart Cities projects as an addition to the service and will utilize Plug & Sense! sensor platform.

3 Conclusions

As demonstrated in this document through the various use cases presented, the Internet of Things is a powerful tool that eases and improves the collection of various types of data in urban environments, with a practically inexistent intrusion into the environment, and minimum deployment, installation or maintenance costs and times.

In the cases presented, information regarding parking, environmental parameters, water quality or visitors flow has been gathered, but the potential for developing new applications with this technology, adapting to each scenario and its requirements, is enormous. Furthermore, it is also shown how the information collected is not only useful for the administration, but also for citizens, tourists, researchers etc.

The diversity of the use cases presented as well as the platforms with which the devices interact is only possible thanks to the great flexibility, scalability and modularity offered by Libelium products. Moreover, the IoT sensors of Libelium, allow the city's administrative bodies to collect data continuously and remotely. These characteristics were taken into account from the initial phases of definition and product design.

As a result, the problem identification processes in smart cities become more agile and accurate, providing the citizens more efficient, less polluted and better organized cities.

In addition, if the access to information is open and free, citizens and enterprises can utilize these data to have a more realistic picture of the city they live, visit or are investing at, and make better decisions in its everyday life. In this case, cities will be also managed more honestly, as allocations of resources and other socio-economic decisions may be made (by the administrations) and judged (by the citizens or other political actors) based on objective data

References

1. Libelium Homepage, www.libelium.com
2. Donald C. Shoup, 2006. “Cruising for parking”, http://shoup.luskin.ucla.edu/wp-content/uploads/sites/2/2015/02/CruisingForParkingAccess.pdf
3. Grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático, 1996. “Tecnologías, políticas y medidas para mitigar el cambio climático”, https://www.ipcc.ch/pdf/technical-papers/paper-I-sp.pdf
4. European Environment Agency, 2017. “Air quality in Europe”, https://publications.europa.eu/es/publication-detail/-/publication/d17e4630-aefa-11e7-837e-01aa75ed71a1/language-en/format-PDF
5. Waspmote Plug&Sense!, www.libelium.com/products/plug-sense/
6. BeitMisk, www.beitmisk.com
7. Data Consult, www.dcgroup.com
8. Ogero Telecom, www.ogero.gov.lb
9. Athens International Airport, www.aia.gr
10. Ex Machina, www.exm.gr
11. Piushaven, www.piushaven.nl
12. Ericsson, www.ericsson.com
13. Meshlium, http://www.libelium.com/products/meshlium/
14. Mallorcawifi.com, Mallorcawifi.com
15. Balearic Ports Authority www.portsdebalears.com
16. International University of the Balearic Islands, www.uib.es
17. Sigfox, www.sigfox.com
18. Getaria town hall, www.getariaturismo.eus
19. Nexmachina Solutions, www.nexmachina.com
20. Smart Parking Sensors, www.libelium.com/products/smart-parking/
21. Montpellier Town Hall, www.montpellier.fr
22. Montpellier Mediterranean Metropole, www.montpellier3m.fr
23. Synox, www.synox.io
24. Factory Systemes, www.factorysystemes.fr
25. Smartphone, cellular and hands-free mobile phone detection, www.libelium.com/products/meshlium/smartphone-detection/
26. Bolton Food and Drink Festival, www.boltonfoodanddrinkfestival.com
27. Innotech Concepts, www.innotechinsights.com

Interés de extensión de proyectos “Smart City” a pequeñas ciudades y entornos rurales según el consumo energético

Alberto López Casillas[1]

[1] Diputación de Ávila, Canteros, s/n 05001, Ávila, Spain

Abstract. Los proyectos de Smart City se dan casi exclusivamente en ciudades con más de 50.000 habitantes, donde vive poco más de la mitad de la población española. La ausencia de proyectos en ciudades de pequeño tamaño o en entornos rurales, Smart Village, no se justifica por los consumos energéticos relativos en estos entornos, ya que se produce un mayor consumo energético por habitante en alumbrado público y en el sector residencial en los municipios menores de 50.000 habitantes que en las ciudades con más población.
La extensión de proyectos “Smart” a municipios pequeños y entornos rurales permitiría una mayor replicabilidad de los proyectos y podría conseguir ratios de ahorro de energía superiores a los que se consiguen en ciudades de gran tamaño, como consecuencia de un consumo base mayor.
Para ello, se antoja necesario ampliar el destino de los fondos de proyectos Smart City para considerar la realidad de pequeños municipios y entornos rurales, así como propiciar modificaciones en la gobernanza de este tipo de proyectos en entornos rurales.

Keywords: Smart Village, Energía, Agrupación, Municipios, Rural.

1 Introducción

El uso del término Smart City ha aumentado desde que, a principios de los 90, se comenzó a hablar del concepto, cuando se autodenominaba “Smart” a la incorporación de infraestructuras de comunicaciones o e-gobernanza [1] . La popularización del término se produjo a partir del año 2000, con importantes incrementos en 2015, como puede comprobarse en el gráfico de apariciones del término de búsqueda “Smart City” (Fig.1).

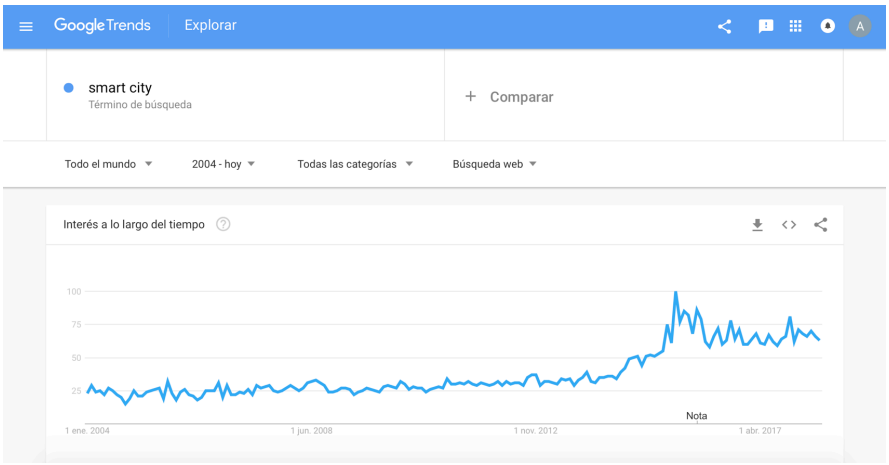


Fig. 1. Evolución de interés en el término "Smart City" desde 2004 (Google Trends).

El incremento en el uso del término Smart City se ve reflejado en la aplicación del mismo a las ciudades, ya que son sólo ciudades las que han aplicado el concepto y disponen de proyectos en este sentido, como demuestran las 81 ciudades españolas asociadas a la Red Española de Ciudades Inteligentes, en la que la ciudad de menor tamaño asociada es Alzira, con 44.554 habitantes [2].

En cambio, el término Smart Village, concepto incluido dentro del trabajo temático de "Zonas Rurales Inteligentes y Competitivas" de la ENRD (European Network for Rural Development), y que pretende ser el término equivalente a Smart City para zonas rurales, no presenta una tendencia alcista similar al término "Smart City" en su interés, como refleja el gráfico de interés a lo largo del tiempo del término de búsqueda "Smart Village" (Fig. 2).

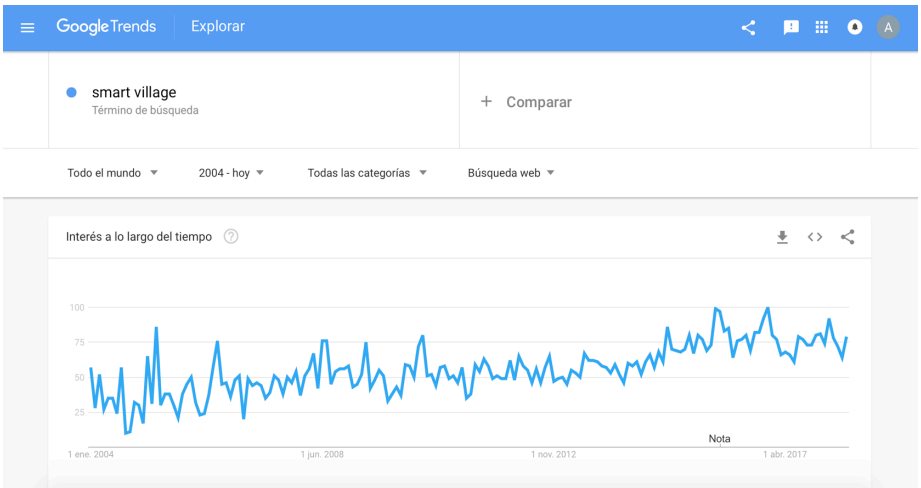


Fig. 2. Evolución de interés del término "Smart Village" desde 2004. (Google Trends)

Este menor impacto se corresponde con un menor grado de implicación de pequeños municipios, que en la Red Española de Ciudades Inteligentes reciben el nombre de "Municipio Amigo" y que cuenta con 25 asociados frente a las 81 ciudades.

Más allá de la evolución individual del interés de los conceptos a lo largo del tiempo, la comparación en términos relativos del impacto de ambos términos, refleja una clara ventaja del término "Smart City" frente a "Smart Village", con una media de interés desde 2004 de 38 frente a 3, según Google Trends (Fig. 3).

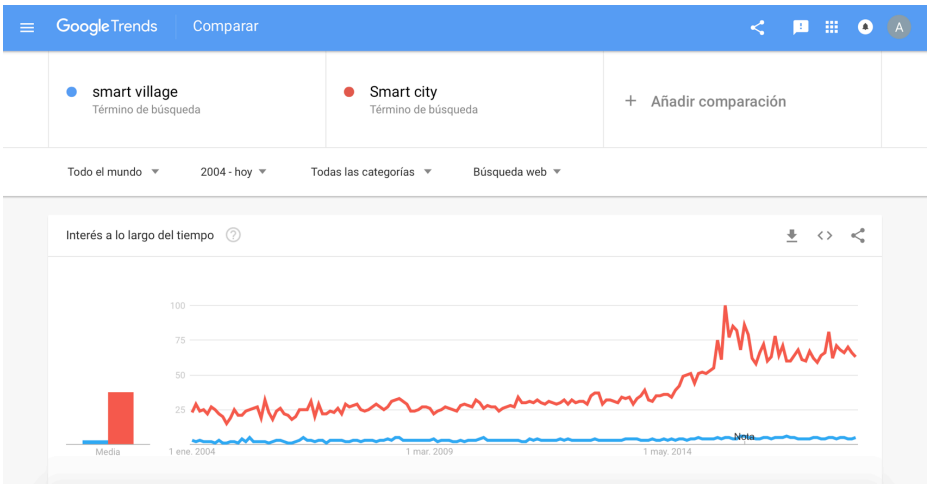


Fig. 3. Comparación de la evolución de interés del término "Smart City" Vs "Smart Village" desde 2004. (Google Trends)

Esta diferencia, tanto en término de búsqueda del término como en ciudades asociadas y con proyectos "Smart" no se corresponde con las diferencias entre los dos entornos, ciudad y rural.

Por un lado, de los 8.124 municipios que existían en España en 2017, 145 (1,78%) tenían más de 50.000 habitantes . De los municipios de más de 50.000 habitantes [3], 80 (55,17%) están inscritos en la Red Española de Ciudades Inteligentes. En cambio, de los 7.979 municipios de menos de 50.000 habitantes que existen en España (98,22%), sólo 26 están inscritos en la red, uno como "Ciudad Inteligente" y 25 como "Municipios Amigos" [4], lo cual demuestra que en términos globales, la participación en proyectos "Smart" se centra principalmente en ciudades de gran tamaño, mientras que existe un gran número de ciudades y municipios de pequeño tamaño que se quedan fuera de este tipo de proyectos.

Por otro lado, de los 46.572.132 habitantes en España en el año 2017, 24.459.850 habitantes (52,52%) viven en ciudades de más de 50.000 habitantes, mientras que un 47,48% de la población habita en municipios de menos de 50.000 habitantes. Es decir, en términos generales, la mayoría de acciones Smart City se centran en municipios en los que viven algo más que la mitad de la población española, mientras que la otra

mitad, que vive en municipios de menos de 50.000 habitantes, no encuentra, salvo casos puntuales, proyectos Smart en su territorio.

Estas diferencias entre número de proyectos según el tamaño del municipio de que se trate podría inducir a pensar que los temas tratados en Smart Cities no son lo suficientemente atractivos para los municipios de pequeño tamaño que encontramos en los entornos rurales. No obstante, los grupos de trabajo de la Red Española de Ciudades Inteligentes (1. Innovación Social; 2. Energía; 3. Medio Ambiente, Infraestructuras y Habitabilidad Urbana; 4. Movilidad Urbana; 5. Gobierno, Economía y Negocios) [5], se alinean con las necesidades que, a priori, podrían necesitar satisfacer los entornos rurales y los pequeños municipios.

A continuación se pretende analizar qué motivos hacen que los proyectos de Smart Cities se concentren en grandes ciudades, analizando cuestiones energéticas.

2 Implicaciones en término de energía

El objetivo de los proyectos Smart City en términos de energía, de acuerdo a las actividades que aparecen en el grupo de trabajo de Energía de la Red Española de Ciudades Inteligentes son (i) Información, formación y difusión a los ciudadanos en el ámbito de la eficiencia energética y (ii) Instalaciones municipales: edificios Smart space, eficiencia en el alumbrado público, instalaciones de energías renovables.

Para el análisis de las implicaciones de la diferencia entre Smart City y Smart Rural en términos de energía se han analizado proyectos de Smart City en ciudades y su potencial de desarrollo en municipios menores, en cuestiones de alumbrado público y de renovación de edificios residenciales, como dos elementos presentes en la mayoría de estrategias de Smart City, por sus implicaciones energéticas y económicas.

Los proyectos considerados son del ámbito territorial de Castilla y León, una región marcada por el carácter rural, una baja densidad de población y una mayoría de la población en municipios menores de 50.000 habitantes.

2.1 Consumo de energía en provincias según tamaño de municipios

Castilla y León tiene 2.447.519 habitantes, de los cuales 1.068.766 (43,67%) viven en municipios de más de 50.000 habitantes, y 1.378.753 (56,33%) lo hacen en municipios de menos de 50.000 habitantes, en contraposición a los porcentajes del conjunto de España, en que el 52,52% vive en municipios de más de 50.000 habitantes [6].

Cada provincia muestra una distribución distinta, que va desde Soria, con el 100% de sus habitantes en municipios de menos de 50.000 habitantes hasta Valladolid, con un 57,65% de su población en municipios de más de 50.000 habitantes.

	Población Provincia	Municipios de más de 50.000 habitantes		Municipios de menos de 50.000 habitantes	
		Habitantes	%	Habitantes	%
Ávila	162.514	58.083	35,74%	104.431	64,26%
Burgos	360.995	176.608	48,92%	184.387	51,08%
León	473.604	192.639	40,68%	280.965	59,32%
Palencia	164.644	79.137	48,07%	85.507	51,93%
Salamanca	335.985	144.949	43,14%	191.036	56,86%
Segovia	155.652	52.257	33,57%	103.395	66,43%
Soria	90.040	0	0,00%	90.040	100,00%
Valladolid	523.679	301.876	57,65%	221.803	42,35%
Zamora	180.406	63.217	35,04%	117.189	64,96%
TOTAL	**2.447.519**	**1.068.766**	**43,67%**	**1.378.753**	**56,33%**

Fig. 4. Población total, población según tamaño de municipios y porcentaje de población según tamaño de municipios en provincias de Castilla y León.

El consumo de energía eléctrica presenta una relación directa entre la población total y el consumo de energía eléctrica total (Coeficiente de correlación de 0,9290). El tratamiento de los datos de consumo de energía eléctrica de Uso doméstico presenta una mayor correlación (0,9687), con una relación aún mayor si se compara el consumo doméstico con la población de la provincia en municipios de tamaño inferior a 50.000 habitantes (0,9779).

Por el contrario, el consumo de energía eléctrica de uso industrial en provincias según población en municipios de menos de 50.000 habitantes presenta una relación menor (0,7248) a la de la relación que presenta según la población total (0,8639) o la de provincias según población en municipios de más de 50.000 habitantes (0,9058) (Fig.5).

	Consumo de energía eléctrica (MWh/año)		
	TOTAL	Uso doméstico	Uso industrial
Ávila	619.966	231.934	384.271
Burgos	2.350.775	442.407	1.907.401
León	2.006.441	677.655	1.327.841
Palencia	1.029.236	196.287	832.073
Salamanca	1.387.981	463.117	923.521
Segovia	861.328	299.127	562.190
Soria	671.264	133.573	537.533
Valladolid	2.651.575	601.976	2.048.004
Zamora	696.636	257.533	438.270
TOTAL	12.275.202	3.303.609	8.961.104
Correlación con población total	0,9290	0,9687	0,8639
Correlación con población de municipios de más de 50.000 habitantes	0,9446	0,8936	0,9058
Correlación con población de municipios de menos de 50.000 habitantes	0,8193	0,9779	0,7248

Fig. 5. Consumo de energía eléctrica total, de uso doméstico y de uso industrial y correlación con datos de población según tamaño de municipios.

En cuanto al consumo de energía térmica, la relación es alta si se compara el total de la población (0,7897), con valores mayores según la población en municipios de más de 50.000 habitantes (0,8338) que si se compara con población en municipios de menos de 50.000 habitantes (0,6547).

Si se comparan los distintos combustibles que conforman el consumo de energía térmica para provincias según población de menos de 50.000 habitantes, la menor correlación se da para el gas natural (0,5492) por el menor despliegue de red en zonas rurales, y la mayor para el consumo de butano+propano (0,8559) (Fig. 6).

	Consumo de energía térmica (MWh/año)			
	TOTAL	Gas natural	Butano+propano	Gasóleo C
Ávila	669.848	352.269	121.278	196.301
Burgos	5.448.507	5.149.403	130.278	168.825
León	3.162.303	2.196.600	184.663	781.040
Palencia	2.293.710	2.073.123	75.579	145.008
Salamanca	2.007.068	1.417.394	166.347	423.327
Segovia	1.243.615	797.401	89.283	356.931
Soria	1.091.213	887.464	37.632	166.118
Valladolid	4.733.659	4.282.230	128.413	323.016
Zamora	931.441	728.589	76.209	126.643
TOTAL	21.581.363	17.884.473	1.009.681	2.687.209
Correlación con población total	0,7897	0,7110	0,7906	0,6152
Correlación con población de municipios de más de 50.000 habitantes	0,8338	0,7804	0,6866	0,4446
Correlación con población de municipios de menos de 50.000 habitantes	0,6547	0,5492	0,8559	0,7873

Fig. 6. Consumo de energía térmica total, de gas natural, de Butano+Propano y de Gasóleo C y correlación con datos de población según tamaño de municipios.

2.2 Alumbrado Público. Potencia instalada y coste por habitante según tamaño de municipio en la ciudad y la provincia de Ávila

La ciudad de Ávila desarrolló durante el año 2013 un proyecto de sustitución del alumbrado público dentro de su estrategia Smart City. El proyecto intervino en 13.000 luminarias de la ciudad [7], para su sustitución a tecnología LED. El resultado, tras la modificación, es que el municipio de Ávila cuenta con 15.056 luminarias, con una potencia instalada de 1.367,9 kW, es decir, una potencia media de 90,86 W/luminaria. Contando con una población de 58.083 habitantes [8], la proporción de luminaria por habitante es de 0,259 puntos/habitante y la potencia instalada es de 25,92 W/habitante.

En cambio, la provincia de Ávila (excluyendo la capital), cuenta con 51.467 luminarias, con una potencia instalada de 6.481 kW, es decir, una potencia media de 125,93 W/luminaria. Contando con una población de 104.431 habitantes [9], la proporción de luminarias por habitante es de 0,493 puntos/habitante. Es decir, la potencia instalada es de 62,06 W/habitante.

Si estimamos 4.000 horas/año como periodo de encendido del alumbrado y un coste medio de la energía utilizada de 7,5031 c€/kWh (Considerando una tarifa 2.0.DHA con un coste en periodo valle de 5,5238 c€/kWh, un coste en periodo punta de 15,4203 c€/kWh y una distribución del consumo de 80/20 respectivamente), el coste de consumo de energía por habitante es de 10,13 €/habitante·año en la capital y de 26,69 €/habitante·año en la provincia.

2.2 Consumo energético en viviendas. Comparación según ubicación de viviendas en zona urbana y zona rural

En este caso se analizan dos ejemplos de intervenciones en zonas urbanas y el equivalente en términos de población con municipios en entornos rurales.

El ejemplo elegido es el de Torrelago (Laguna de Duero), actuación de rehabilitación desarrollada dentro del proyecto CityFied [10] . El proyecto de rehabilitación previsto en España por el proyecto se desarrolla en Laguna de Duero, abordando la rehabilitación energética de 1.488 viviendas en las que habitan unas 4.000 personas [11], que se distribuyen en unos 78.240 m2 (Imagen 1). El consumo energético anterior a la realización de actuaciones de las viviendas era de 140 kWh/m2·año.

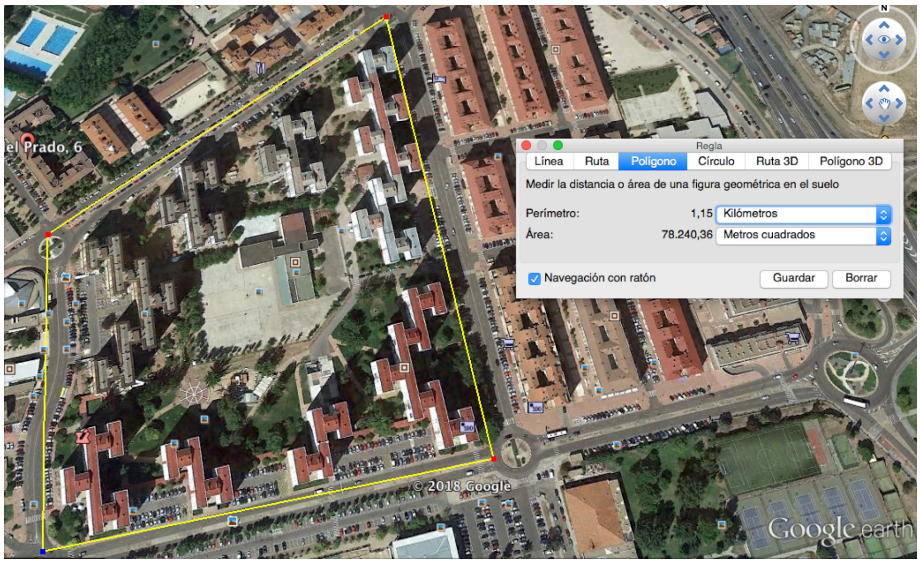


Imagen 1. Vista aérea y superficie de límites del proyecto CityFied en Torrelago (Laguna de Duero) (Google Earth).

Un municipio de población similar a la que existe en la zona de intervención anterior, es El Tiemblo, municipio de la provincia de Ávila con 4.143 habitantes y un número de viviendas igual a 1.740 [12], que se distribuyen en una superficie del término urbano del municipio de unos 840.770 m2 (Imagen 2). El consumo energético de las viviendas del municipio es de 30.226 MWh/año [13], es decir, 239 kWh/m2·año.

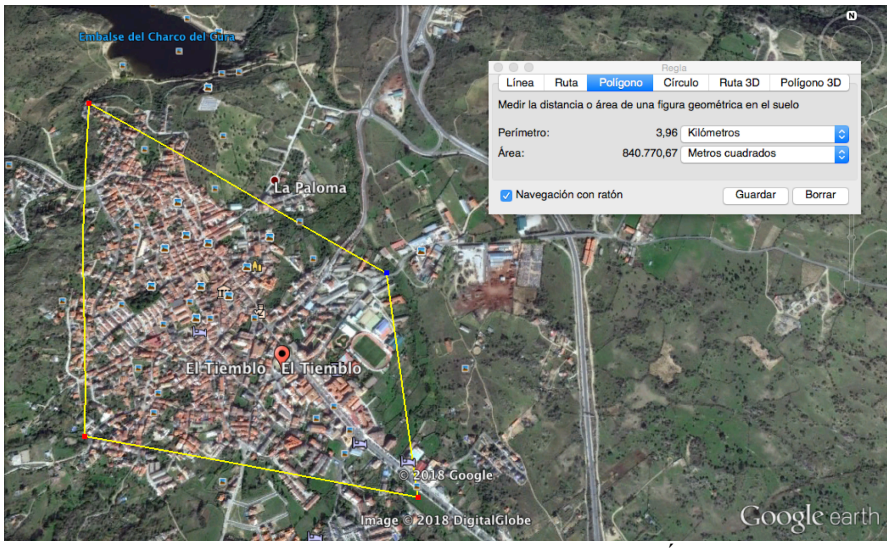


Imagen 2. Vista aérea y superficie de límites de El Tiemblo (Ávila) (Google Earth).

3 Discusión

El número de proyectos de "Smart Village" entendiendo éstos como proyectos equiparables a "Smart City" pero en municipios de pequeño tamaño o en entornos rurales es mucho más reducido que el de proyectos en ciudades de más de 50.000 habitantes, por lo que casi la mitad de la población en España, que vive en municipios de menos de 50.000 habitantes, no se beneficia de proyectos "Smart" en su territorio, a pesar de que las necesidades de alcanzar los objetivos que fijan las estrategias de "Smart City" afectan también a los entornos rurales.

En términos de energía, en los municipios más pequeños, se comprueba una mayor relación de consumo/habitante para el uso doméstico, como demuestra un coeficiente de correlación entre el consumo y los habitantes en ese tipo de municipios mayor, por lo que el consumo por vivienda es superior en pequeños municipios que en municipios más grandes. Este hecho, según datos generales, se confirma con los datos de consumo por superficie en Torrelago (140 kWh/m2·año) y el que se da en un municipio de población similar al de la intervención en Torrelago, como es El Tiemblo (239 kWh/m2·año).

En términos de alumbrado público, se comprueba una diferencia entre entornos urbanos y rurales que demuestra un mayor consumo de energía eléctrica de alumbrado público por habitante en municipios de pequeño tamaño (62,06 W/habitante en municipios de la provincia de Ávila) que en ciudades (25,92 W/habitante en la ciudad de Ávila).

Estos hechos muestran que las actuaciones de Smart City realizadas en ciudades no responden a maximizar el ahorro potencial de energía por la incorporación de medidas de ahorro, eficiencia energética o energías renovables, ya que las mayores tasas de

ahorro de acciones como intervención en viviendas o alumbrado público se darían en los entornos rurales.

Una posible razón de la concentración de estas intervenciones en ciudades puede deberse a la menor superficie donde se actúa, concentrando actuaciones en viviendas y/o alumbrado público en un espacio más reducido, como demuestra la superficie en la que viven 4.000 personas en un entorno urbano como Torrelago (78.2401 m2) y la superficie en la que vive un número de personas similares en un entorno rural como El Tiemblo (840.770 m2).

Otro motivo puede deberse a la dificultad de agrupar actuaciones en municipios de entornos rurales para que la agregación resulte en inversiones atractivas para las empresas, y sobretodo, que la agrupación cuente con personal adecuado como para ejecutar y evaluar la realización de proyectos, aspecto imposible de conseguir para municipios de forma individual.

Por último, el soporte financiero público para desarrollo de proyectos de Smart Cities se centra principalmente en ciudades, por lo que el acceso a financiación para la realización del proyecto o la ejecución de las medidas previstas, es más complicado por la falta de apoyo en municipios pequeños.

4 Conclusiones

La extensión de los proyectos “Smart City” a las ciudades de pequeño tamaño y entornos rurales propiciaría una replicabilidad de proyectos importante, ya que son muchos más los municipios pequeños que los grandes, y éstos albergan a cerca del 50% de la población española.

Una modificación del interés por intervenir en proyectos de Smart Cities en pequeños municipios hacia consumos de energía por habitante en vez de consumos brutos o concentrados en una superficie determinada, podría incrementar el interés de realizar proyectos de Smart City en municipios pequeños o agrupaciones de estos, y los resultados de ahorro de energía serían mayores por partir de una situación de consumo relativo por habitante menor.

Para ello, la posibilidad de agrupación de municipios de reducido tamaño, el acceso a fondos de promoción y ejecución de proyectos para esta tipología de municipios y la promoción de estructuras de gobernanza compartidas, pueden conseguir un incremento de proyectos “Smart Village” en pequeñas ciudades y agrupaciones de municipios en zonas rurales.

Referencias

1. Viladecans-Marsal, E. Smart Cities: myths and realities.
2. RECI homepage, http://www.redciudadesinteligentes.es/images/municipios/mapa-ciudades/miembros-reci.pdf, last accessed 2018/06/15
3. INE. Distribución de los municipios por provincias y tamaño de los municipios (2016)
4. RECI homepage, http://www.redciudadesinteligentes.es/index.php/municipios/municipios-amigos, last accessed 2018/06/15
5. RECI homepage, http://www.redciudadesinteligentes.es/index.php/grupos-de-trabajo, last accessed 2018/06/17
6. INE. Población por provincias y tamaño de los municipios (2016)
7. Ayuntamiento de Ávila homepage, http://www.avila.es/ciudad/smartcity/item/1225-la-ciudad-de-ávila-cambia-su-iluminación-para-ahorrar-en-consumo-y-emisiones, last accessed 2018/06/19
8. INE. Avila: Población por municipios y sexo (2016)
9. INE. Avila: Población por municipios y sexo (2016)
10. CITYFIED homage, http://es.cityfied.eu/, last accessed 2018/06/18
11. ESMARTCITY homepage, https://www.esmartcity.es/comunicaciones/proyecto-europeo-cityfied-estrategia-para-rehabilitacion-transformacion-espacios-residenciales-urbanos-areas-energia-casi-nula, last accessed 2018/06/20
12. INE. Censos de Población y Viviendas (2011)
13. SINCEO2, Inventario de emisiones de gases de efecto invernadero en la provincia de Ávila. Proyecto e-AIRE.

Agradecimiento

El autor agradece a la Red Temática de la CYTED “CIUDADES INTELIGENTES TOTALMENTE INTEGRALES, EFICIENTES Y SOSTENIBLES (CITIES) nº 518RT0558.

Soluciones tecnológicas de Vodafone para gestionar ciudades inteligentes

Natalia López Palomar[1] and Gonzalo Fernández Espeso[1]

[1] Vodafone España, S.A.U. Avenida de América, 115 28042 Madrid Spain

Abstract. Vodafone tiene en su ADN la innovación y la aplicación de las tecnologías más punteras para la creación de soluciones que ayuden a gestionar comunicaciones y servicios de una forma más eficiente. Con este propósito ponemos a disposición de las ciudades Vodafone Smart Cities, una solución en la nube para la operación y gestión de municipios basada en un modelo de pago por uso, que se adapta a ciudades de cualquier tamaño y diputaciones por ser modular y escalable. Como parte de la solución se incluye la operación y gestión del servicio, tarea que se lleva a cabo en el Vodafone Smart Center de Sevilla. Se detallan en esta comunicación tres proyectos de ciudad inteligente que se han llevado a cabo de la mano de Vodafone Smart Cities como son los de los municipios de La Rinconada, Andújar y Martorelles.

Keywords: Innovación, Emprendimiento, Smart Cities, Big Data, Desarrollo, Internet of Things, Internet de las Cosas, Eficiencia. Nuevas tecnologías.

1 Vodafone en la Innovación

Vodafone es una compañía que apuesta por la Innovación como instrumento para crear una sociedad avanzada donde ciudadanos, empresas y Administración Pública convivan en un entorno en armonía, moderno, donde la actividad diaria se gestione de forma ágil y eficiente lo que es determinante para lograr una sociedad con mayores cotas de bienestar y de calidad de vida.

La Administración Pública necesita de creatividad e innovación para lograr esas metas. En esta línea, Vodafone está trabajando en este ámbito para proporcionar a las Administraciones soluciones tecnológicas que ayuden a fomentar el cambio "innovador" en el desarrollo de nuestras organizaciones, construyendo el camino hacia lo que se conoce como Smartcities o ciudades inteligentes.

Para Vodafone una Smartcity sería una ciudad que desarrolla su funcionamiento apoyándose en la tecnología de comunicación e información para mejorar la administración, los servicios públicos, y la calidad de vida de sus ciudadanos. La gran diversidad de tecnologías de sensorización disponibles actualmente permite recopilar información y tomar "el pulso" a la ciudad, para una gestión rápida y eficiente.

2 Vodafone Smart Cities

Vodafone Smart Cities es la propuesta de Vodafone para la gestión eficiente y sostenible de municipios, ciudades y diputaciones. Se trata de una solución cloud, en modo pago por uso, basado en colaboración con terceros (open innovation), que optimiza los servicios públicos como la gestión de activos, residuos, alumbrado público o eficiencia energética entre otros. Pero lo que es más importante de la propuesta es que está conectada con el ciudadano. Porque los ciudadanos estamos cada vez más implicados y participamos más en la mejora y desarrollo de nuestras ciudades.

Vodafone Smart Cities tiene importantes beneficios tanto para los gestores municipales al ofrecerles información integrada y de valor sobre todo lo que está ocurriendo en su ciudad en tiempo real gracias a los sensores y dispositivos conectados, para la toma de decisiones de gobierno y operativa municipal, como para las personas que las habitan, ya que facilita una comunicación abierta y colaborativa entre el ayuntamiento y sus ciudadanos, reduce la energía consumida, minimiza el impacto en emisiones de CO_2, etc.

Después de las primeras implantaciones que comenzaron en el año 2015, se han ido obteniendo resultados muy interesantes, que han permitido testar y mejorar la solución hasta la versión que presentamos ahora. Por ejemplo, hemos optimizado mucho las funcionalidades de información sobre iluminación con farolas inteligentes, gestión de residuos, generación de informes de operativa, etc.

3 Vodafone Smart Center

El servicio se gestiona desde Vodafone Smart Center, centro ubicado en Sevilla que va camino de cumplir su tercer año de existencia y por el que han pasado más de 300 clientes interesados en este tipo de soluciones [2].



Fig. 1. Área de Demostraciones de Vodafone Smart Center

Vodafone Smart Center es un centro nacido con el doble objetivo de crear un ecosistema de innovación alrededor de tecnologías Smart y Big Data, al mismo tiempo

que alberga la operación y mantenimiento de las ciudades que han sido desplegadas. Vodafone Smart Center pone la tecnología al servicio de las personas ayudando a humanizar las ciudades y mejorando la percepción que los ciudadanos tienen de los servicios públicos prestados: movilidad, eficiencia de edificios, seguridad y emergencias, energía, agua, salud -analítica de datos médicos o monitorización de enfermos crónicos, educación, turismo y comercio inteligente, entre otros. Vodafone Smart Center es también la sede del Programa Minerva, la iniciativa promovida por la Junta de Andalucía y Vodafone para el impulso de proyectos de emprendimiento tecnológico que se ha consolidado como un referente en el sector como así lo demuestran reconocimientos como el Premio Ingenio, que posicionan a Vodafone Smart Center como el mejor proyecto puesto en marcha por una empresa privada para el desarrollo empresarial dentro del sector tecnológico.

A lo largo del último año se ha lanzado dentro de Vodafone Smart Center una nueva área de actividad dedicada a la homologación de soluciones Smart y Big Data, bajo el denominado Programa SEA PARTNER. Las soluciones homologadas contarán con el certificado correspondiente que las habilitará como soluciones aptas y recomendadas para ser integradas con la plataforma Vodafone Smart Cities. El proceso de homologación conllevará acceso a herramientas y entornos de pruebas, creación de entornos para automatización y promoción nacional de los productos y soluciones homologados.

4 Casos de éxito

4.1 La Rinconada

El primer usuario de Vodafone Smart Cities ha sido el municipio de La Rinconada, un municipio sevillano de 40.000 habitantes donde se ha tomado la decisión de apostar por las soluciones inteligentes de Vodafone. Entre otras cabe citar el inventario online de todos los activos implicados en el mobiliario urbano como las farolas y contenedores para mantener un registro avanzado de todas las características de cada elemento, unificando la gestión que antes se realizaba de una forma más deslocalizada.

Así, es posible recoger datos muy valiosos que entran a formar parte de la información de la ciudad, que se procesa de forma inteligente para crear informes o generar alarmas, que ayudan a la detección temprana de anomalías o problemas que se pueden afrontar de una forma mucho más ágil. Los datos se recogen a través de sensores desplegados en diferentes elementos del mobiliario urbano, pero no son las únicas fuentes de información, ya que el sistema es capaz de cargar ‘open data’ procedente de fuentes abiertas como Aemet, para incorporar datos de meteorología como criterio para actuaciones como regulación de la iluminación o generación de avisos al ciudadano. De esta forma, cualquier persona en el municipio podrá, mediante una app móvil incluida en el catálogo de servicios de la solución, abrir una incidencia si, por ejemplo, encuentra cualquier elemento del mobiliario urbano en mal estado. Esta incidencia es recogida por el sistema y procesada según un protocolo que contempla además devolver información al ciudadano sobre el estado de su incidencia.

Gestión de residuos: asimismo, en este municipio sevillano se han desplegado sensores de contenedores de residuos para la recolección de datos que permiten generar informes para los gestores municipales, informándoles sobre la evolución de los niveles de llenado y temperatura, por ejemplo, para diferentes tipos de contenedores y residuos urbanos, para conseguir una gestión mucho más eficiente del servicio de recogida de residuos, con un consiguiente ahorro en combustible y otros recursos, ya que se opera basándose en datos reales.

En lo referente a la gestión del alumbrado, se han desplegado dispositivos en diferentes puntos de luz en el municipio, desde farolas tradicionales de vapor de sodio hasta luminarias led o cuadros de control de líneas de luminarias. La regulación, según criterios de iluminación ambiental real, posibilita ahorros apreciables tanto en consumo de energía como económicos, ya que se adapta a las necesidades reales del municipio.

Edificios Municipales. La eficiencia energética se ha llevado también al ámbito de los edificios municipales. Se han sensorizado dos colegios para obtener datos reales e inmediatos de los consumos de energía. También se dispone de un cuadro de mando que muestra la evolución histórica de consumos en diferentes parámetros energéticos, y esta información también se traduce a términos económicos, de forma que las decisiones de los responsables municipales en términos de gestión de energía pueden estar soportadas por datos reales y detallados.

4.2 Andújar

Andújar ha desarrollado su proyecto de Smart Cities en base al despliegue de un conjunto de sensores que permite la obtención de datos en tiempo real, gestionando de forma eficiente el alumbrado público, la recogida de residuos, los recursos hídricos así como integración en la plataforma de la información de plazas disponibles de parking. Además se ha desarrollado una App ciudadana para la gestión de incidencias reportadas por los ciudadanos.

A través de los sensores desplegados para el servicio de alumbrado público se abre la posibilidad de personalizar los perfiles de iluminación en horas exactas y del encendido y apagado de las mismas. La regulación del alumbrado en base a los criterios de iluminación ambiental real, posibilita ahorros apreciables tanto en el consumo de energía como económicos, ya que es totalmente adaptable a las necesidades reales del municipio, reduciendo el impacto medioambiental.

Por mediación de los sensores desplegados en los contenedores de residuos urbanos se puede medir y monitorizar tanto el nivel de llenado como la temperatura de los mismos, establecer una serie de alarmas para los distintos tipos de contenedores y residuos urbanos, y conseguir así una gestión mucho más eficiente del servicio de recogida de residuos con el consiguiente ahorro de combustible, reducción de emisiones de CO_2 y otros recursos, ya que se ejecuta basándose en datos reales.

Gracias al despliegue de sensores que miden la humedad y temperatura del suelo, Vodafone acerca al municipio de Andújar la gestión eficiente de uno de los recursos más importantes que existen, el hídrico. Para ello se muestra un mapa interactivo con la última toma de datos en el que se puede medir y emitir solicitudes de riego manual y duración. A través del desarrollo de informes de seguimiento es posible la optimiza-

ción aún mayor del proceso de gestión inteligente del servicio de riego con agua reduciendo el uso de este recurso y costes económicos asociados al riego.

En relación al servicio de Parking de Vodafone Smart Cities se podrá visualizar la disponibilidad de plazas en parkings privados de forma totalmente integrable con los sistemas de parking locales.

La colaboración de Vodafone con Andújar para la creación de una App ciudadana da como resultado la posibilidad de integrar al ciudadano en la gestión eficiente de su ciudad. Mediante el uso de la misma el ciudadano puede notificar una incidencia si, por ejemplo, detecta cualquier tipo de elemento del mobiliario urbano en mal estado. Esta incidencia es recogida por el sistema y procesada según un protocolo que además contempla devolver información al ciudadano sobre el estado de resolución de su incidencia.

Por todo ello, Vodafone en colaboración con el Ayuntamiento de Andújar ha permitido que el municipio desarrolle soluciones inteligentes para el alumbrado público, gestión de recogida de residuos y recursos hídricos y sensorización de parkings permitiendo un ahorro en coste, un menor impacto medioambiental y una mejora de la imagen pública de sus gestores de cara al ciudadano.

4.3 Martorelles

El Ayuntamiento de Martorelles ha apostado por las soluciones de gestión inteligente de Vodafone para Smart Cities. Cabe citar el inventariado online de activos del mobiliario urbano (farolas, contenedores, etc.) que permite hacer un seguimiento del estado de las características de cada elemento, unificando la gestión de los mismos que antes se hallaba descentralizada.

Vodafone y Martorelles se unen para desarrollar una ciudad inteligente que gestiona sus activos de forma online, optimiza sus recursos y permite hacer un seguimiento y control de los mismos gracias a los informes generados por la plataforma. Toda la información es generada a través de la sensórica desplegada en el mobiliario urbano y a la App de uso interno dónde el técnico de campo del Ayuntamiento de forma rápida e intuitiva notifica las incidencias, comprueba el estado de las mismas y, en definitiva, se consigue una optimización de los tiempos de trabajo y los recursos empleados.

En cuanto al despliegue de sensores se ha puesto foco en la gestión de los servicios tanto del alumbrado público como de la recogida de los residuos urbanos.

Una gestión eficiente del alumbrado público supone un ahorro energético y una reducción de costes en los presupuestos del ayuntamiento, todo ello gracias a la instalación de sensores en diferentes puntos de luz del municipio en los que se permite personalizar los perfiles de iluminación en horas exactas y del encendido y apagado de las mismas.

La gestión inteligente de los residuos urbanos permite una optimización de las rutas de los camiones de la basura, así como un menor impacto ambiental o también integración con otros servicios públicos como el de bomberos gracias a la detección inmediata de incendios de los contenedores. A través de los datos que recogen los sensores se puede medir y monitorizar tanto el nivel de llenado como la temperatura de los mismos y establecer una serie de alarmas para los distintos tipos de contenedores y residuos urbanos.

En lo referido a la gestión de eficiencia energética se está monitorizando el consumo de energía en un cuadro eléctrico de un edificio público, lo que permitirá optimizar su consumo y reducir el impacto ambiental.

Referencias

1. http://www.vodafone.es/smart-cities

[2] Para visitar Vodafone Smart Center enviar solicitud de vista a la dirección de correo electrónico: smartcenter@vfsmartcenter.com.

Edificios inteligentes para ciudades inteligentes: el edificio I+D+i del Campus de Soria.

Valbuena García, Francisco [1], González Díaz, María Jesús [2,] Gutiérrez Cid, Cristina[3]

[1] Unidad Técnica de Arquitectura. UVA- Plaza Santa Cruz nº 6- 47002 Valladolid, España . dirección.unidad.tecnica@uva.es
[2] Torre de Comares Arquitectos. Fray Luis de León 24- 47002 Valladolid España-info@mjg.es
[1] Arquitecta. Evaluadora VERDE-^{GBCe}. Valladolid .

Resumen. El nuevo edificio de la Universidad de Valladolid en el Campus Duques de Soria dotará a este Campus de una infraestructura funcional y polivalente, dedicada a actividades de I+D+i y formación especializada, Los requisitos de diseño, implementación y uso han sido establecidos para constituir un edificio de consumo de energía casi nulo. Esto se logra a través de dos estrategias: soluciones de diseño múltiples que minimizan la demanda de energía y, en segundo lugar, la incorporación de un conjunto de tecnologías seleccionadas con estrictos criterios de eficiencia energética para generar energía a partir de recursos renovables en el lugar, apoyados en sistemas exhaustivos de gestión y control de uso. Se resumen los criterios aplicados y la metodología para dar un paso más en la realización de edificios sostenibles, especialmente en lo que respecta al aprovechamiento de las condiciones externas y la ubicación para conseguir hacer del solar un recurso energético propio, y conseguir una gestión adecuada de la demanda de energía a través del almacenamiento. La simulación dinámica realizada con el software específico Design Builder versión 5 muestra una reducción total de consumo de energía final del 84% respecto a los requerimientos actuales del Código Técnico de la Edificación, y del 81% en energía primaria no renovable, lo que supone un 86% de reducción de emisiones de CO_2. Estos resultados dan una calificación energética A al edificio y están siendo evaluados y verificados por terceras partes mediante las certificaciones de sostenibilidad internacional LEED y nacional VERDE^{GBC}

Keywords: Edificios inteligentes, Almacén de energía, EECN

1 Introducción general

1.1 Flujo de energías

Los edificios son la interfaz que modula cómo se producen los flujos energéticos entre el ambiente exterior y el interior. Son, en su conjunto, un sistema energético que debe responder a las necesidades de confort de sus ocupantes atenuando el consumo de energía, parte del cual puede ser considerado como inevitable dependiendo de las

características ambientales y del entorno pero, aun así, puede ser reducido y optimizado a través de diferentes estrategias, una de las cuales es el almacenamiento[1, 2, 3]. Este ha sido el criterio para establecer la estrategia energética básica del edificio, tras el conocimiento teórico ya conocido[4,5] y la experiencia previamente adquirida en la realización de los edificios LUCIA[6] e IndUVA[7], edificios de consumo casi nulo de energía ya promovidos por la Universidad de Valladolid.

Mientras que los factores que determinan las estrategias para proveer el confort interior son extrínsecos al edificio (parámetros climáticos, geográficos y topográficos del emplazamiento), las características físicas y geométricas del edificio son las que van a definir cómo se producen los flujos energéticos, por lo que en ellos reside la capacidad para atenuar -reducir o regular- las necesidades de aporte de energía que compensen, en pro de unas condiciones interiores, las condiciones exteriores cambiantes[8].

Por ello es fundamentalmente necesario conocer con detalle los factores externos a los que el edificio debe adaptarse, para que su respuesta sea óptima. Esto nos lleva a un planteamiento multidisciplinar en el que es preciso integrar diferentes criterios y objetivos, teniendo presente que el edificio más eficiente es aquel que logra regular y equilibrar fluidamente la interacción que se produce entre el entorno, el edificio y sus usuarios en todos aquellos aspectos que se desean controlar: luz, sonido, aire, energía, agua, radiación, residuos, etc.

1.2 Sistema interconectado

Si consideramos el antes y después de un edificio, y comparamos el solar antes de la edificación y después de su hipotética desaparición, a lo largo de su vida útil en el edificio se han transformado y agotado materiales, se ha consumido y modificado la calidad del agua, se han producido residuos, se ha contaminado el aire, y se han producido otros muchos impactos al medio. Todos estos criterios conciernen a la sostenibilidad en sus términos generales, y han sido considerados fundamentales en la realización del proyecto. El edificio concentra y cataliza numerosos procesos con repercusión ambiental para dar utilidad a sus ocupantes. A su vez, no está aislado y depende de redes de escala superior que le proveen de muchos de los recursos que necesita. El edificio es en sí mismo un sistema de sistemas, incluido en un sistema superior, que es la ciudad. No podría haber "ciudades inteligentes" si los subsistemas-edificios no tuvieran una cierta capacidad de adaptarse al funcionamiento de ese sistema superior que es la ciudad.

2 Necesidades y programa.

2.1 El programa: diversos niveles de educación.

La Universidad de Valladolid, en el soriano Campus Duques de Soria, ha comenzado a construir un edificio dentro de este contexto conceptual de sostenibilidad, anticipándose a los requerimientos de la Directiva Europea EPBD 2010/31/UE relativa a la eficiencia energética de los edificios y a los de su actual revisión Directiva (UE) 2018/844, de aparición posterior al proyecto del edificio.

Su objetivo es dotar de una infraestructura polivalente para actividades de I+D+i y formación especializada, adaptada a los actuales modelos de educación, investigación y transferencia de conocimientos del Espacio Europeo de Investigación (EEI) y del Espacio Europeo de Educación Superior (EEES).

El programa es complejo. Su superficie construida es de 3.500 m^2, compuesta por un espacio de 910 m^2 destinado a laboratorios o plantas pilotos que necesitan grandes dimensiones tanto en planta como en altura, y otro de 2.590 m^2 distribuido en cuatro plantas. En ellas se ubicarán el resto de laboratorios (300 m^2), las unidades mixtas de investigación y despachos para profesores e investigadores (600 m^2), sedes de las delegaciones del Parque Científico y de la Fundación General de la Universidad de Valladolid, un vivero de Empresas De Base Tecnológica (EBT), las aulas de formación especializada (600 m^2) y el resto de espacios comunes e instalaciones.

La inversión total es 4.500.000 € (IVA incluido), cofinanciada por la Consejería de Educación de la Junta de Castilla y León (70%) y la Universidad de Valladolid (30%).

2.2 Experiencias y conocimiento previas para un ejemplo concreto

Este edificio supone un paso más en el interés de la Universidad de Valladolid por conseguir una sostenibilidad global dentro de su área de influencia. Iniciativas como la calefacción de distrito de biomasa, tanto del propio Campus soriano como el de Valladolid, la realización de edificios de grandes alcances en materia de sostenibilidad, como los edificios LUCIA e IndUVA y la rehabilitación del Campus Mergelina, suponen un proceso gradual hacia el conocimiento y la investigación en materia de la sostenibilidad que está en pleno desarrollo. Las lecciones aprendidas en estos otros edificios e iniciativas contribuyen a la investigación y desarrollo de edificios "de consumo de energía casi nulo" (Nearly zero-energy buildings, NZEBs) y de menor impacto ambiental, y han servido como experiencias previas en éste [9]. Todo el conocimiento acumulado de manera conjunta en estos edificios irá marcando las nuevas líneas de investigación.

2.3 El edificio y sus usuarios: una herramienta educativa.

Otra interesante característica de este proyecto es que la Universidad ha decidido que el edificio sea en sí mismo una herramienta educativa, añadiendo al currículo formativo de la escuela el estudio de las características bioclimáticas, energéticas y de sostenibilidad del edificio. Esto hace posible la implicación de los usuarios (profeso-

res y alumnos) y del gestor de mantenimiento en las operaciones del edificio. La experiencia del usuario, que se convierte así en partícipe y a su vez difusor de sus criterios, es otra baza en el conocimiento sobre sostenibilidad. Las estrategias de ventilación, el uso adecuado de ventanas u otros sistemas operables en determinadas fechas y horarios habrán de formar parte de este conocimiento.

3 Planteamientos previos: una aproximación externa al problema

3.1 Entorno geográfico y climático

Este edificio se construye en el Campus de Soria, en un espacio situado junto al borde norte colindante con el campo de fútbol de los Pajaritos. El solar tiene un fuerte desnivel de aproximadamente 10 m., que se aprovecha para la ubicación semienterrada del edificio para favorecer su interacción con el terreno. (Fig. 1)



Fig. 1. El edificio (centro) en su entorno. Orientación y edificios cercanos.

El clima en Soria ciudad es del grupo E1 según el Código Técnico de la Edificación (CTE), y es de tipo templado-cálido. Desde un punto de vista de las temperaturas se considera de tipo continental, con gran oscilación térmica entre las estaciones de invierno y verano. El invierno es largo y frio: de noviembre a marzo las temperaturas medias no superan los 10°C. En julio y agosto las temperaturas medias se encuentran en torno a los 20°C, por lo que los veranos son suaves. La oscilación térmica entre invierno y verano es de 17 °C.

Los valores de precipitaciones en la ciudad indican un régimen menor de 600 mm por lo que se puede caracterizar como seco. La radiación solar directa oscila de 0,97 kWh/m^{2}dia en diciembre a 5,43 kWh/m^{2}dia en julio; y la radiación difusa entre 0,75 a 2.05 kWh/m^{2}día en los mismos meses respectivamente. Siendo una radiación importante, no es de las mayores en España.

3.2 El viento.

Por las condiciones topográficas locales y de altitud, el viento en este emplazamiento tiene especial impacto. El régimen de vientos es constante durante todo el año con unas velocidades superiores a las que cabría esperar en un entorno urbano. Las direcciones dominantes son la NNE, O y OSO. En el propio Campus hay una estación meteorológica que recoge datos de temperatura, lluvia, humedad, velocidad y dirección del viento. Estos registros son bastante coincidentes con los que ofrece el observatorio de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) para la ciudad de Soria, e indican que en los meses de verano y principio de otoño la dirección dominante de vientos es la NNE y SSE, mientras que el resto del año, de noviembre a mayo, predominan los vientos con componente Oeste.

El solar tiene una forma peculiar, mixtilínea y geométricamente muy irregular. Se trata de una parcela aislada y en situación urbana suficiente (aunque no totalmente) despejada. Además del obligatorio estudio geotécnico se ha realizado un Ensayo de Respuesta [Test de Respuesta Térmica (TRT) y Test de Respuesta Geotérmica (TRG)] para conocer la variación de la temperatura del terreno que circundará parte del edificio.

El estudio geotécnico revela un terreno compuesto por una primera capa de tierra vegetal, una segunda capa compuesta por gravas calizas y por arenas limosas; una tercera capa de roca arenisca meteorizada y una capa profunda de conglomerado de gravas silíceas en los inicios a calizas con la profundidad. Las características geotécnicas analizadas han sido las de densidad, cohesión, rozamiento interno y permeabilidad de cada nivel encontrado.

Los Ensayos Geotérmicos de Respuesta (TRT/TRG) indican realizable un campo de captación con intercambiadores geotérmicos verticales de baja entalpía en circuito cerrado, que podría suministrar un régimen de temperaturas determinado para su uso en sistemas de evaporación y condensación del edificio.

Para ello se ha realizado, en combinación con los sondeos del estudio geotécnico, una perforación de 100 m de profundidad y 130 mm de diámetro con un intercambiador de calor vertical. La evaluación del test se lleva a cabo con el programa GeRT-CAL, según una evaluación algorítmica. Se ha realizado un perfil de temperatura del que se desprende que no es estable en las primeros metros de profundidad, y esto se debe a que la capa superior de la corteza terrestre está sometida a intercambios con-

vectivos de calor con el aire atmosférico, y radiantes con el sol y el espacio exterior que determinan una variación en su temperatura a lo largo del día y la noche, así como de las estaciones del año. En el terreno en el que se pretende construir el edificio el perfil de temperaturas, realizado en el mes de diciembre de 2015, se observa que la temperatura en el terreno no se estabiliza hasta una profundidad de aproximadamente 20 m.

4 Estrategias : el solar como recurso energético

4.1 Avanzando en el bioclimatismo.

El espacio disponible del solar se encuentra condicionado por varias circunstancias, entre otras, la actividad que se pretende realizar en el edificio, el acceso de vehículos de carga, la forma y distancias mínimas a los solares colindantes y la topografía. Las habituales condiciones de diseño de fachadas conforme a su orientación y radiación solar, han sido aquí ampliadas dando un paso más en el diseño bioclimático, de acuerdo con la experiencia acumulada en los edificios de consumo casi nulo de energía ya citados construidos previamente por la Universidad de Valladolid.

La diferencia de condiciones interiores que requiere el programa ha hecho aconsejable realizar dos volúmenes diferentes yuxtapuestos: uno de 910 m^2 destinado a los laboratorios que necesitan mayores dimensiones tanto en planta como en altura, y el otro de 2.590 m^2. Este segundo, que tiene horarios de funcionamiento, de trabajo y de condiciones de confort distintas al anterior, se ha distribuido en cuatro plantas para contener el resto de laboratorios de menores dimensiones (300 m^2), las unidades mixtas de investigación y despachos para profesores e investigadores (600 m^2), los despachos, las aulas de formación especializada (600 m^2) y el resto de espacios comunes e instalaciones.

Dos de los niveles del edificio, talleres y laboratorios, se construirán contra la ladera, aprovechando las dos plataformas naturales que hay en el emplazamiento. De esta forma se reduce la demanda de energía para estos espacios, permitiendo poner en práctica una estrategia de acondicionamiento pasivo en el edificio mediante la acumulación de energía en los muros de contención y en el terreno. La ladera puede considerarse como un importante reservorio o acumulador de temperatura. (Fig. 2)



Fig. 2. Dos volúmenes en función de usos. Fachadas de orientación NO.

El diseño del edificio, alargado en dirección NO-SE, con una anchura de 13,50 m, permite ventilación cruzada a través de ventanas en ambas fachadas en dirección barlovento-sotavento, tal como indica la rosa de los vientos. El eje longitudinal del edificio se encuentra desviado 38° O respecto de la dirección N-S. Por otra parte, es preciso tener en cuenta la existencia de construcciones de mayor altura del edificio que se pretende construir en las orientaciones oeste y suroeste, por lo que la incidencia del viento en estas orientaciones será menor.

La selección para el edificio de materiales constructivos con eco-etiquetas o de bajo contenido en Componentes Orgánicos Volátiles (COV) y formaldehidos en disolventes, vinilos, PVC, suelos de goma, alfombras de nylon, tableros de madera, fibra de vidrio, adhesivos y pinturas etc., reduce uno de los mayores contaminantes del aire interior, lo que facilita el trabajo de limpieza de aire.

4.2 Estrategia general

El uso característico del edificio es el uso docente, y por tanto debe adaptarse a un calendario universitario, un horario intermitente e irregular y una ocupación variable. Existen por una parte cargas y consumos energéticos muy poco variables a lo largo del día, como son la iluminación, equipos ofimáticos, de proyección, pizarras digitales, etc., y por otro cargas con enorme variabilidad asociadas a la ocupación de los espacios, debidas tanto a los horarios como al número de usuarios. La ocupación se mantiene constante por periodos de una hora, pero con grandes oscilaciones a lo largo del día, donde se pueden registrar ocupaciones que fluctúan entre el 10% y el 60% con picos del 80% de la ocupación máxima.

Esta enorme variación de la ocupación, unida a las pequeñas cargas térmicas asociadas a los equipos y a la iluminación de los espacios, se traducen habitualmente,

entre otros, en bajas demandas de calor, que suelen llegar incluso a anularse en invierno.

El foco de la estrategia energética general se ha puesto pues en el almacenamiento de energía por sistemas pasivos[10]. que ha resultado ser la más aconsejada tras el estudio de las condiciones climáticas y del solar, ya comentadas. El almacenamiento energético aprovechando la masa térmica de los muros de contención y el terreno permite la creación inteligente de eficiencia energética distribuida, modificando el patrón de consumo de energía del edificio, al desacoplar la demanda y la producción[11]. Como resultado, la inversión y los costes de operación de las instalaciones para la producción de frío o calor, su transmisión y distribución, se pueden reducir y el rendimiento del sistema mejora a lo largo de la vida útil. Con tal fin se propone un sistema de tubos geotérmicos que trabajen en modo pasivo contra el terreno y un muro de contención, concebido como un suelo radiante en vertical, que nos permitan acumular energía procedente de las fuentes internas del edificio y, si fuera necesario, energía producida en los momentos de menor demanda o coste.

Para lograr lo anterior es imprescindible trabajar también en la inercia del edificio en su conjunto, pues cuanta más tenga, su respuesta a una variación de la temperatura será más lenta. Así, cuando "se alcance el equilibrio" se habrá producido un retardo o desfase en el tiempo, que se utiliza para evitar emplear energía para mantener o alcanzar la temperatura de confort interior. Este planteamiento exige trabajar con pequeñas variaciones de temperaturas en largos plazos de tiempo.[12]

Se han hecho esfuerzos concretos en la mejora del aislamiento de los paramentos, la eliminación de puentes térmicos y una cubierta vegetal extensiva para aumentar al máximo la inercia. El aumento del rendimiento de las superficies vidriadas, y el equipamiento más eficiente con técnicas de recuperación del calor, junto con la utilización sistemática de fuentes de energía renovable locales completan la estrategia.

4.3 Aprovechando el régimen de vientos para la ventilación

Las direcciones dominantes son la NNE y O, siendo más habituales las NNE y SSE en verano, por lo que el edificio podría llevar a cabo una estrategia de ventilación natural pasiva que colabore a reducir las necesidades de refrigeración si bien, por esta misma razón, para evitar infiltraciones indeseadas las carpinterías del edificio deben ser de alta calidad. El clima del lugar tiene saltos térmicos diarios (oscilaciones de 14ºC en junio y 16ºC en julio) que permiten la refrigeración nocturna en las épocas en las que el edificio la necesita (se considera vacío el edificio en agosto)

Los contaminantes que deterioran la calidad del aire interior en cada uno de los usos son diferentes. Además de considerar los COV de los materiales constructivos, se tendrán en cuenta el tipo de materias primas y trabajo que se realice en cada taller y espacio; en las aulas los contaminantes serán presumiblemente los producidos por el metabolismo de los usuarios y la presencia de ordenadores portátiles, empleándose como indicador el CO_2; y en los despachos, además del metabolismo de sus ocupan-

tes, la concentración de benceno debido a la presencia de ordenadores, fotocopiadoras, impresoras, etc. El hecho de alojar en diferentes volúmenes los diferentes usos, y por tanto sus diversos contaminantes, permite también abordar de forma individualizada para cada uso el sistema idóneo que garantice la calidad del aire interior. (Fig. 3)



Fig. 3 – Vista de los dos volúmenes diferenciados. Fachadas de orientación NE.

La ventilación cruzada y la ventilación nocturna se presentan pues como posibilidades muy aceptables. El recorrido previsible del aire en las aulas, en función del calendario y horario de uso, tendría una secuencia de: 1-entrada (barlovento); 2-zona contaminada (aula); 3-zona menos contaminada (pasillo); 4-salida (sotavento). El recorrido a la inversa (4-3-2-1), bastante frecuente de acuerdo a la rosa de los vientos del lugar, sería también admisible para mejorar la calidad interior del aire. Este recorrido teórico podría ser objeto de simulación de forma que la existencia de zonas muertas o no afectadas por el recorrido natural del aire fueran conocidas y analizadas.

En los despachos el recorrido previsible del aire, en función del calendario y horario de uso, tendría una secuencia de: 1-entrada (barlovento); 2-zona contaminada (despacho); 3-zona menos contaminada (pasillo); 4-zona contaminada (despacho); 5-salida (sotavento). Este recorrido teórico sería más efectivo como refrigeración nocturna, con el objeto de enfriamiento pasivo nocturno más que como garantía de calidad interior del aire en horario diurno.

4.4 La geotermia del terreno

El terreno posee unas características apropiadas (composición, conductividad térmica y otras) para plantear un aprovechamiento de su capacidad de acumulación de energía mediante intercambiadores tierra-agua, sondas geotérmicas y muro de conten-

ción, también para instalar un intercambiador tierra-aire en superficie, pues la amplitud térmica decrece rápidamente proporcionando a partir de los 2,5 m de profundidad temperaturas del terreno por debajo de los 15ºC en los meses estivales.

En ambos casos, geotermia por agua o por aire, se trataría de sistemas de muy baja temperatura por lo que el terreno no debe considerarse como una fuente de energía, sino como un sistema de almacenamiento de energía capaz de compensar las fuertes variaciones externas que condicionan el confort interior. Resulta por ello necesario llevar a cabo un balance de cargas entre el edificio y el terreno en el caso de la geotermia por agua, y establecer un sistema de control de temperaturas del aire exterior y del terreno en el caso de la geotermia superficial.

Se ha planteado un intercambiador tierra-aire con tubos geotérmicos, también llamados tubos canadienses o tubos provenzales y erróneamente "pozos canadienses". Esto consiste en uno o varios tubos enterrados por los que se hace circular aire exterior para introducirlo después en el edificio. A lo largo del tubo se produce un intercambio de energía entre el terreno y el aire circulante, lo que da lugar a un calentamiento o enfriamiento.

Un parámetro crucial a la hora de diseñar un intercambiador tierra-aire es determinar la temperatura del terreno a la profundidad en la que se sitúa el sistema de intercambio. El problema es complejo y viene estudiándose desde hace más de un siglo. Otros parámetros físicos del terreno son importantes para su eficiencia, en particular su difusividad, la conductividad, el calor específico y la densidad del material. En este caso, vistas las condiciones del emplazamiento, y el caudal de aire exterior de renovación que se precisa, se ha diseñado un intercambiador compuesto por 48 tubos de PE (80), enterrados a tres profundidades: 1,50, 2,50 y 3,50 m. El sistema no es totalmente pasivo; requiere de un ventilador que fuerce la entrada de aire en los tubos, y se debe dotar de un sistema de control que analice la temperatura exterior.(Fig. 4).



Fig. 4. Bocas de entrada a los tubos geotérmicos en la ladera. Fachada orientación SO.

También se ha previsto un sistema de intercambio tierra-agua consistente en un campo de captación de pozos verticales y un muro de sótano al que se le incorpora una red de tuberías de polietileno en forma de U. Este sistema se diseña y dimensiona, al igual que el anterior, para trabajar en modo pasivo, es decir que el consumo de energía esperado es el que producen las bombas de impulsión del agua. El sistema se ha estudiado de forma que no se produzca un desequilibrio en las temperaturas del terreno, es decir compensando estacionalmente los aportes y extracciones de energía. No obstante, en función de las condiciones puntuales de temperatura, el sistema podrá proporcionar una mayor o menor potencia, por lo que, para garantizar en todo momento las condiciones de confort interior, se considera incorporar una bomba de calor geotérmica.

4.5 La radiación solar: tecnología Solarwall.

En invierno las temperaturas exteriores son inferiores a las de confort; no obstante la radiación solar es una fuente energética disponible en esta época del año, con un periodo cíclico de aparición diurna. En invierno, debido a la inclinación de la eclíptica, el sol sale por el SE y se pone por el SO, por lo que en este periodo las orientaciones para lograr un aprovechamiento óptimo comprenden el arco definido SE-S-SO y las posiciones vertical-horizontal-vertical, pues el ángulo solar también varía en el ciclo.

Respecto a la radiación incidente sobre las fachadas del edificio, la que recibe menor radiación solar es la NE, resultando la más adecuada para ubicar el grueso de las actividades con mayor carga interna, si bien de abril a septiembre, en las primeras

horas del día, hay fuertes ganancias por radiación que pueden ser parcialmente paliadas con oscurecimiento temporal y permitiendo ventilación natural cruzada. Las fachadas SE y SO presentan una alta radiación solar durante un número elevado de horas, por lo que resultan aptas para instalar sistemas solares de captación de energía térmica por aire o agua, o producción de energía eléctrica mediante tecnología fotovoltaica. En el nivel cero del edificio se plantean unos espacios para albergar unos laboratorios-talleres, con unos requisitos superiores de volumen a los habituales. Estos espacios conforman un cuerpo adosado al edificio principal, con unas características diferenciadas del resto del edificio, y por ello se plantea un sistema de captación solar en la fachada sureste, llamado Solarwall, que permite calentar de forma gratuita las grandes masas de aire que se necesitan para acondicionar este espacio.

El sistema consiste en aprovechar el aire que se calienta en una pequeña cámara controlada por efecto de la radiación solar sobre una chapa metálica microperforada. Para ello se adosa una segunda piel a la fachada del edificio por la que, en invierno, se hace circular aire exterior que por fenómenos de conducción, convección y radiación eleva su temperatura entre 15 y 40ºC antes de ser introducido al interior del edificio mediante el sistema general de climatización o mediante una red paralela.

Esta doble piel, además de permitir el calentamiento gratuito de aire, anula o reduce las pérdidas térmicas por el cerramiento en el que se adosa. En verano, el aire no es forzado al interior de la cámara, por lo que esta actúa como una fachada ventilada, aportando sombra al cerramiento y permitiendo flujos de aire ascendente. Aunque está menos estudiado, y la posición no es la óptima, este sistema también permitiría, en los meses de verano, invertir el funcionamiento y realizar refrigeración nocturna, lo que permite bajar la temperatura del interior del edificio utilizando el efecto de irradiación de calor a cielo despejado nocturno.

A la vista de las condiciones climáticas en el emplazamiento, se estima que el sistema funcionará en modo calefacción desde octubre hasta abril, ambos meses incluidos. Los datos para estudiar la eficiencia de este sistema son el la orientación, la radiación solar, el volumen de aire a tratar, el horario de funcionamiento, el calendario de trabajo, la temperatura interior de consigna, y la superficie y la absortividad del captador. De acuerdo con ello, se estima una energía renovable captada anual de 25,3 MWh.

4.6 Resumen de estrategias energéticas

De forma resumida, los criterios energéticos empleados en el Proyecto del edificio han sido los siguientes:

-Se climatizarán despachos y aulas; los laboratorios únicamente se calefactarán.

- La necesidad de aportación de frío se considera escasa, por el aislamiento y la aportación de los tubos geotérmicos, por lo que se proveerá utilizando la bomba de calor geotérmica en modo free-cooling, es decir, que se hará circular agua por las

sondas geotérmicas sin utilizar la bomba de calor, de forma que con la temperatura del terreno se reduzca considerablemente.

- La producción de calor se hace mediante una bomba de calor agua-agua del tipo geotérmico, capaz de suministrar 84,136 KW en calor con un COP del 4,2 y hasta 69,10 KW en frío, con una potencia absorbida de 20,03 KW a 400 V.

- En la zona de despachos se propone la instalación de un suelo radiante/refrescante capaz de proveer calor en invierno y frío en verano.

-En la zona de aulas, que precisa sin embargo un elevado trabajo de ventilación, se dota al edificio de un climatizador de aire primario.

-Geotermia mediante tubos geotérmicos, con un total de 10 perforaciones de 150 metros de profundidad, a base de sondas de polietileno reticulado de 4x32 mm.,

- Sistema Solarwall de captación solar en la fachada sureste, para calentar el gran espacio destinado a laboratorio.

-El agua caliente sanitaria se alimenta la red de calor a biomasa de la calefacción por distrito que posee el Campus.

Las estrategias han sido aumentadas con otras muchas decisiones y sistemas pasivos sobre elementos eficientes, especialmente en los sistemas de gestión (en iluminación sistema DALI; sistemas eficientes; elementos y dispositivos de bajo consumo, gestión y control de consumo, etc.). El modelado de toda la información de la construcción se ha materializado mediante su diseño integrado Building Information Modeling (BIM), integrando los diferentes criterios y objetivos constructivos y de gestión desde las fases iniciales del diseño, La simulación energética dinámica se ha realizado con la herramienta EnergyPlus 8.5.0.

5 Resultados

5.1 Resultados energéticos comparados

Los resultados en cuanto al comportamiento energético eficaz del edificio, derivado de la simulación energética realizada, son muy positivos. El conjunto de estrategias energéticas, monitorizado y gestionado para el uso eficiente presenta una reducción total de consumo de energía final del 86% respecto a los requerimientos actuales del Código Técnico de la Edificación (Fig. 6), y del 60% respecto a los estándares de sostenibilidad de la American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) (Fig., 5) obteniendo valores de edificio de consumo de energía casi nulo (NZEB) pretendidos. Las gráficas incluyen los datos referidos a iluminación y energía para los equipos del edificio.

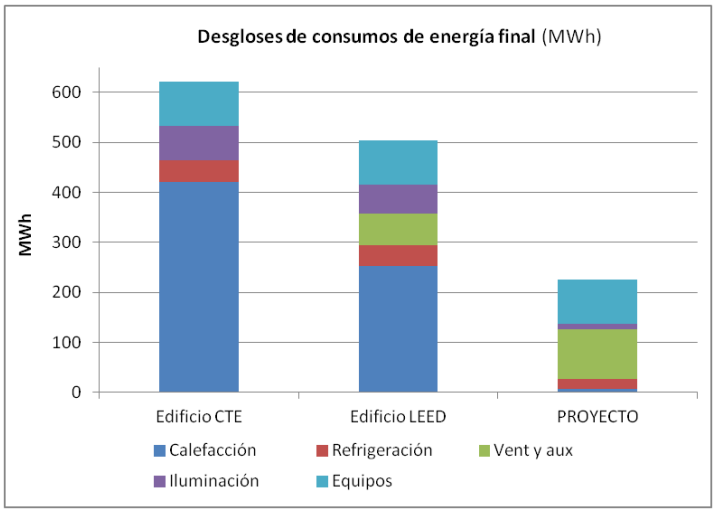


Fig. 5. Gráfico comparado entre las demandas de edificios de referencia CTE, LEED (ASHRAE) y el Proyecto de Soria.

El cuadro de la Fig. 6 muestra los resultados previstos diferenciados en cuanto a calefacción, refrigeración, iluminación, equipos interiores y varios, y refleja la comparativa de consumos entre un edificio de las mismas características (el edificio de referencia) que cumpliera simplemente el Código Técnico Español (CTE), y finamente las demandas previstas para el edificio de Soria. Se obtienen reducciones de demanda de energía funcional del 84% en iluminación, del 98% en calefacción y del 56% en refrigeración.

Edificio de referencia CTE

	Demanda	EF	Coef paso EP	EP no renv	Coef paso CO2	Emisiones CO2	
	kWh	*kWh*	*kWh/kWh*	*kWh*	*kgCO2/kWh*	*kgCO2*	
Calefacción	330.103,7	471.576,8	1,179	555.989,0	0,311	146.660,4	
Refrigeración	69.888,2	41.110,7		80.330,3		13.607,6	
Iluminación		131.557,6	1,954	257.063,6	0,331	43.545,6	
Equipos		102.033,2		199.372,8		33.773,0	
TOTALES		**746.278,2**	*kWh*	**1.092.755,7**	*kWh*	**237.586,6**	*kgCO2*
		283,1	*kWh/m2*	**414,6**	*kWh/m2*	**90,1**	*kgCO2/m2*

PROYECTO

	Demanda	EF	Coef paso EP	EP no renv	Coef paso CO2	Emisiones CO2	
	kWh	*kWh*	*kWh/kWh*	*kWh*	*kgCO2/kWh*	*kgCO2*	
Calefacción		12.557,8		24.537,9		4.156,6	
Refrigeración		4.546,2		8.883,4		1.504,8	
Ventiladores		51.734,3		101.088,9		17.124,1	
Bombas		10.973,9		21.443,1		3.632,4	
Recuperación		1.595,2	1,954	3.117,0	0,331	528,0	
Iluminación		19.510,2		38.123,0		6.457,9	
Equipos		102.033,2		199.372,8		33.773,0	
Generación FV		-14.916,6		-29.147,1		-4.937,4	
TOTALES		**188.034,2**	*kWh*	**367.418,9**	*kWh*	**62.239,3**	*kgCO2*
		71,3	*kWh/m2*	**139,4**	*kWh/m2*	**23,6**	*kgCO2/m2*

Calificación energética

	Energía final	EP no renv	Emisiones CO2		
	kWh/m2	*kWh/m2*	Clase	*kgCO2/m2*	Clase
Edificio de referencia CTE	**244,4**	**339,0**	**D**	**77,3**	**D**
EDIFICIO PROYECTADO	**38,3**	**63,8**	**A**	**10,8**	**A**
Ahorros alcanzados	*84%*	*81%*		*86%*	

Nota: En el procedimiento de calificación energética no se tiene en cuenta el consumo de equipos de procesos, informática, miscelaneos, etc. Sí la carga térmica que producen en el sistema.

Fig. 6- Cuadro resumen comparativo entre resultados CTE y edificio proyectado

5.2 Sostenibilidad

Una de las bases de partida del proyecto era conseguir un edificio no sólo eficiente energéticamente sino también sostenible, considerando como tal un edificio sensible y consciente de los impactos ambientales que puede producir a lo largo de su vida útil. Para afrontar este reto existe ya suficiente conocimiento, y se sabe ya la forma de reducir estos impactos sin renunciar a los patrones de comodidad que deseamos.

Los métodos de evaluación medioambiental de los edificios unifican este conocimiento y hacen sistemático su estudio y aplicación. El sistema VERDE[GBCe13] analiza varias áreas mediante aplicadores e indicadores en diferentes áreas de impacto ambiental (agotamiento de recursos no renovables, aportación al cambio climático, pérdida de fertilidad del suelo, afección a la vida acuática, agotamiento de aguas potables, etc.) así como aspectos como la accesibilidad, la calidad interior del aire, el nivel de bienestar para los usuarios y criterios económicos. Tanto este método como "Leadership in Energy & Environmental Design" (LEED) serán aplicados en este edificación por entidades externas. Estando actualmente en proceso de aplicación, (el edificio comenzó su construcción a principios del año 2018), los resultados esperados son óptimos con ambos métodos.

6 Conclusión

En los edificios terciarios, como el edificio que se presenta, la elevada carga interna hace de la refrigeración y la ventilación, y por tanto del consumo eléctrico, el principal gasto energético. En el caso de este edificio se han empleado las estrategias de producción de energía in situ, junto a la de almacenamiento de energía térmica y la flexibilidad con tecnologías que se adaptan rápidamente a las cargas operativas. Esto permite que los sistemas activos generen la energía en los momentos de coste eléctrico más barato. Se establece así una relación de equilibrio con la red mediante la gestión de la demanda, colaborando a la estabilidad del sistema de red, y nivelando los momentos-pico.

Los resultados obtenidos en la simulación y los métodos de evaluación ambiental corroboran los beneficios de esta estrategia. El edificio realiza un papel activo en interacción con el sistema de suministro, lo que supone un paso esencial hacia verdaderas ciudades inteligentes con edificios inteligentes. El resultado combina un edificio de alto grado de sostenibilidad, con avances en la consecución de edificios de consumo casi nulo de energía, y supone un paso para redes mucho más eficientes en el suministro colectivo de las ciudades.

Referencias

[1] Paksoy, H.; Snijders, A.; Stiles, L. State-of-the-art review of aquifer thermal energy storage systems for heating and cooling buildings. In Proceedings of theEffstock Conference, Stockholm, Sweden, 5–17 June (2009)

[2] Novo, A.V.; Bayon, J.R.; Castro-Fresno, D.; Rodriguez-Hernandez, J. Review of seasonal heat storage in large basins: Water tanks and gravel-water pits. Appl. Energy (2010), 87

[3] International Energy Agency (IEA). Energy Conservation through Energy Storage (ECES) Programme; Brochure, International Energy Agency: Paris, France, (2016); Available online: http://www.iea-eces.org/files/090525_broschuere_eces.pdf

[4] Basecq, V.; Michaux, G.; Inard, C.; Blondeau, P. Short-term storage systems of thermal energy for buildings: A review. Adv. Build. Energy Res. (2013), 7

[5] Dincer, I.; Rosen, M.A. Thermal Energy Storage: Systems and Application; John Wiley & Sons: Chichester, UK, (2011)

[6] Valbuena, F., González, MJ. La experiencia del edificio LUCIA: estrategias imprescindibles para conseguir el edificio de equipamiento de cero energía y en sostenibilidad. LUCIA Building experience: essential strategies for sustainability to achieve Near Zero Energy Building". 5th European Conference on Energy Efficiency and Sustainability in Architecture and Planning. EESAP5.ISBN 978-84-9082-003-2. San Sebastián 7-9 /07/ (2014) Pp.211-218

[7] Valbuena, F., González, MJ. A new model of architectural intervention in teaching buildings: how to reach the best sustainable performances. The IndUVa in Valladolid (Spain). SEES 2018 Conference. SEES Conference Proceedings ISBN: 978-1-912532-01-8 Fitzwilliam College, University of Cambridge, Cambridge city, United Kingdom, 18-19June (2018)

[8] BPIE, Buildings as micro energy-hubs delivering climate solutions,"BPIE, Brüssel, (2016).

[9] Video: https://www.youtube.com/watch?v=w1woBPGqYQA. Acceso: 2018/09/06

[10] Ma Y, Borrelli F, Hencey B, Packard A, Bortoff S. Model predictive control of thermal energy storage in building cooling systems. In: Proceedings of the 48th IEEE conference on decision and control, Shanghai, China; (2009).

[11] Marques, A.C.; Davies, G.F.; Evans, J.A.; Maidment, G.G.; Wood, I.D. Theoretical modelling and experimental investigation of a thermal energy storage refrigerator. Energy (2013), 55.

[12] Nielsen, K. Et al (2002). Enviro-Core: A new concept for thermal storage, energy conservation and waste reduction in the building industry. Proc. 1st International Conference on Sustainable Energy Technologies, pp.BE 39-43. University of Porto, Porto, Portugal

[13] Valoración de Eficiencia de Referencia de Edificios –Green Building Council-España (VERDE- GBCe) http://gbce.es/certificacion-verde/

Perceptions about causes and ways to mitigate Climate change and its relationship with energy consumption in the residential sector

Yoselyn Walsh[1], Carlos Meza[2], and Alejandra Magana[1]

[1] Purdue University
Department of Computer Information and Technology
West Lafayette, Indiana, USA
ywalsh@purdue.edu,
[2] Tecnológico de Costa Rica
Electronic Engineering School,
Cartago, Costa Rica

Abstract. The role of citizens in the efficient and rational use of a city resources are essential. Moreover, a smart sustainable city should by people centered. Institutions, government and communication media provide technical and non-technical information to citizens in order to educate them and make their behavior more energy efficient. Nevertheless, general public and experts perceptions and concerns can differ. This paper analyses the perception of people regarding climate change and energy efficiency before and after they interact with a multimedia activity that intends to make them aware of energy efficient activities. The test population were undergraduate students living in the Costa Rica Institute of Technology residence hall. The findings obtained in this work can prove useful for the development of graphical user interfaces for smart energy meters or energy monitoring mobile applications that gives useful feedback for promoting energy efficient behavior.

Keywords: computational geometry, graph theory, Hamilton cycles

1 Introduction

Citizens play an essential role in the development of a smart sustainable city [3]. Furthermore, one of the factors determining the success of smart cities are the conscious choices that inhabitants make [12]. Researchers agree that behavior is an uncertain variable in the prediction of energy consumption in buildings [1]. Differences in behavior can produce differences in energy consumption up to 300% [5,7]. Indeed, the needs, wants, values and emotions play a significant role in this panorama [4].

People's behavior and habits related to power consumption has been a topic of research for several years. Whitmarsh in [13] indicates two main reasons on why energy conservation is not adopted: first, because domestic and travel

choices are related with status, norms and social identity. Second, utility companies and governments do not provide a structure for this behavior. More specifically for the residential sector Schipper et. al in [8] named three factors that influenced energy use in households:

- energy prices,
- income, and
- household characteristics such as family size and composition, number of hours the house is occupied, lifestyles, and the dwelling of the occupants.

Van Raaij and Verhallen in [11] identified several reasons why household occupants do not behave in an energy-conscious way, namely,

- they consider energy conservation to be the concern of others (e.g., the government) rather than themselves;
- they are not aware of the energy cost of many household behaviors;
- the feedback information of the household's energy use comes too late to make the occupants aware of energy wasting types of behavior;
- it is perceived that energy-savings will always mean a lack of comfort, and many consumers are unwilling to give it up;
- they are not willing to get involved in energy-saving measures; and
- houses have been badly designed and may be structurally energy inefficient.

The income and the energy prices are determinants for the energy consumption of a household [2], but are not the only concerns of the proenvironmental behavior [9] nor can fully explain energy consumption [5]. According to [10] one of the main reasons why people don't behave pro environmentally is due to a lack of knowledge.

A smart sustainable city should be able to promote pro environmental and energy efficient behavior on its citizens. The mechanisms and technologies required should be first based on a study on the people's perception about their energy consumption. In this regard, the present paper analyzes the perceptions about causes and ways to mitigate climate change and its relationship with energy consumption in the residential sector. We designed a multimedia learning material for an experiment applied to a group of students that live in the dormitories of the Costa Rica Institute of Technology. This study helps to establish a start point to promote energy savings and proenvironmental behavior based on peoples' knowledge and macro and micro perceptions.

The rest of the paper is structured as follows: Next, the activity and experience is described. Section 3 presents the theoretical foundation for the elaboration of the learning activity. Section 4 describes the applied multimedia experience. The paper ends with the results of the activity and a discussion.

2 Description of the activity

2.1 Methods

This single-group study investigated perceptions of causes and ways to mitigate climate change and its relationship with the energy consumption in the residential sector. Perceptions are compared before and after an intervention that

provides information about energy consumption and the impact in household activities.

2.2 Participants

Participants in this study were undergraduate students from the Costa Rica Institute of Technology living in the Residence Halls. A total of 29 students completed the study, 9 females and 20 males. The average age of participants was between 20 and 21 years old. Just 3 students were not part of an engineering program at the university.

2.3 Procedure and data collection method

The study took place in the residence hall of the Costa Rica Institute of Technology. Figure 1 shows the methodology pipeline. To collect data one instrument with open ended questions was developed and used for pretest and posttest. The open ended questions were:

1. What do you think are the causes of climate change?
2. What do you think are ways to mitigate climate change?

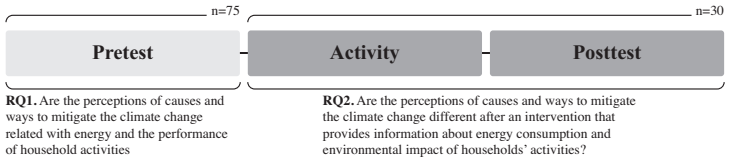


Fig. 1. Methodology pipeline

First, participants answered the questions of the pretest. After the completion of the pretest, a link to the activity was provided to them. Participants interacted with the activity during their free time. Researchers visited the Residence hall and encouraged participants to do the activity. After the completion of the activity, participants had access to the posttest. Researchers had no control during the activity, but participants self-reported a duration of the activity around 10 minutes. A total of 75 students answered the pretest and 30 of them, used the learning module (activity) and answered the posttest. To answer the first question, we use all answers in the pretest and posttest. To answer the second question we only use the participants that complete the study (Figure 1), n=30.

Participants' answers were encoded. Categories and subcategories were created to find trends, similarities and differences between test and participants. Length of the answer varies among participants and between test for the same

participant. For example, subject ID1 mentioned two causes of climate change in the pretest and three causes in the posttest. Subject ID 20 included six causes of climate change in the pretest and three on the posttest. Researchers have no control on the length of the answers.

3 Theoretical Foundation

We used multimedia learning ([6]) as a guidance for the design of this study. The rational of multimedia learning is that people learn better from words (i.e. text or voice) and pictures (i.e. graphics, pictures, animations, videos) than just from words ([6]). Information that is presented in words and pictures increase the self-perception of learning (Serra and Dunlosky, 2010). Butcher (2014) reported studies where multimedia learning: helped to understand function of systems, facilitate a deep and integrated understanding, facilitate problem solving and the application of transfer of learned principles.

Cognitive theory of multimedia learning is based on the multimedia learning principle which is based on three cognitive science principles: dual-channel assumption, limited capacity assumption and processing assumption. Dual-channel assumption concedes that the brain has two channels to process the information, one for pictures (visual/pictorial) and another for auditory information (auditory/verbal). Limited capacity claims that both channels have a limited capacity. Processing assumption claims that processing is through a coordinated set of cognitive processes during learning ([6]).

4 The multimedia experience

We designed a multimedia learning material for this experiment. With the learning material, participants can: (1) measure the impact of the household activities in the energy consumption per person and per groups of people; (2) measure the impact of the energy consumption in the environment and economy per person and per group of people. The design of the learning module included two activities: selection of the learning module's information and the implementation of the multimedia module.

4.1 Selection of the information of the learning module

The material was designed and personalized to the participants. Researchers identified four major energy-consuming activities that the participants usually perform, namely, cooking, studying, showering and washing and drying clothes. It is assumed that all appliances are electric powered.

4.2 Implementation of the learning module

The content of learning module is based on three cases. Each case has three elements: 1) the routine description, 2) energy consumption per appliance, and

3) total cost per routine (economic and environmental). Figure 2 shows the learning module and the three elements.

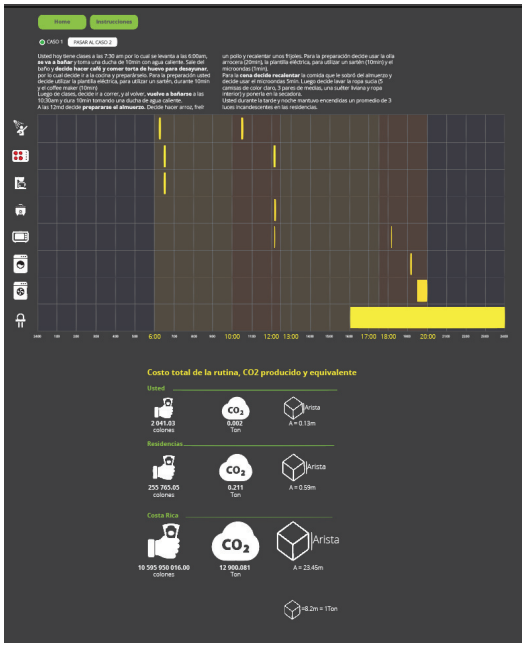


Fig. 2. Elements per case

The three cases are presented to the participants:

- Case 1: low energy consumption scenario
- Case 2: medium energy consumption scenario
- Case 3: high energy consumption scenario

The importance of these three cases is that it is the same routine, but there is a variation in the time using an appliance, resulting in different energy consumption and thus different CO_2 emissions.

The consumption per appliance was showed to the participant using a timeline, where three background colors were used to represent the three different periods: overnight (blue color), off-peak (yellow color) and peak hours (orange color) (see Figure 3). The aforementioned periods are related with the time slots where power is more expensive according to the average power consumption pattern of the city. As seen in Figure 3 The participants are able to click on the bars to get more information about the consumption used by the appliance.

The overall cost per routine was showed to the learner through an infographic the depicts not only the monetary cost but the amount of equivalent CO_2 emitted. Three different scenarios are presented to the participants (see Figure 4):

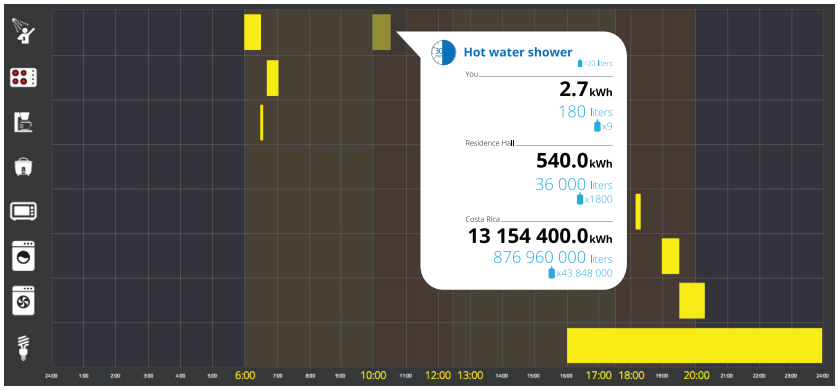


Fig. 3. Representation of the consumption per appliance

– if one person behaves according to the routine,
– if all students living in the residence hall behave according to the routine,
– if the whole population in the country (Costa Rica) behaves according to the routine.

5 Results

5.1 Participants perceptions about causes and ways to mitigate climate change and its relationship with energy consumption and household activities

To answer the first research question about the relationship between energy consumption and household behavior with the perceptions of causes and ways to mitigate climate change, we analyzed all the pretest answers ($n = 75$).

For perception of causes, in the pretest, 3 answers (or 4%) included the energy as cause of climate change. One of the answers mentioned the electricity consumption. Text fragments of the answers are shown next.

S18. The pollution of factories and cars (fuels and gasses). The excess of electricity consumption by the people.
S47. Inadequate use of natural resources **and energy...**
S52. The pollution. The misuse and waste f natural resources. The **misuse of energy**

Household activities related with the causes of climate change are mentioned by 10 participants (13.3%) in the pretest. Household activities include the use of products for household activities and waste. No answer addressed household behaviors. Some examples of answers related with household activities are:

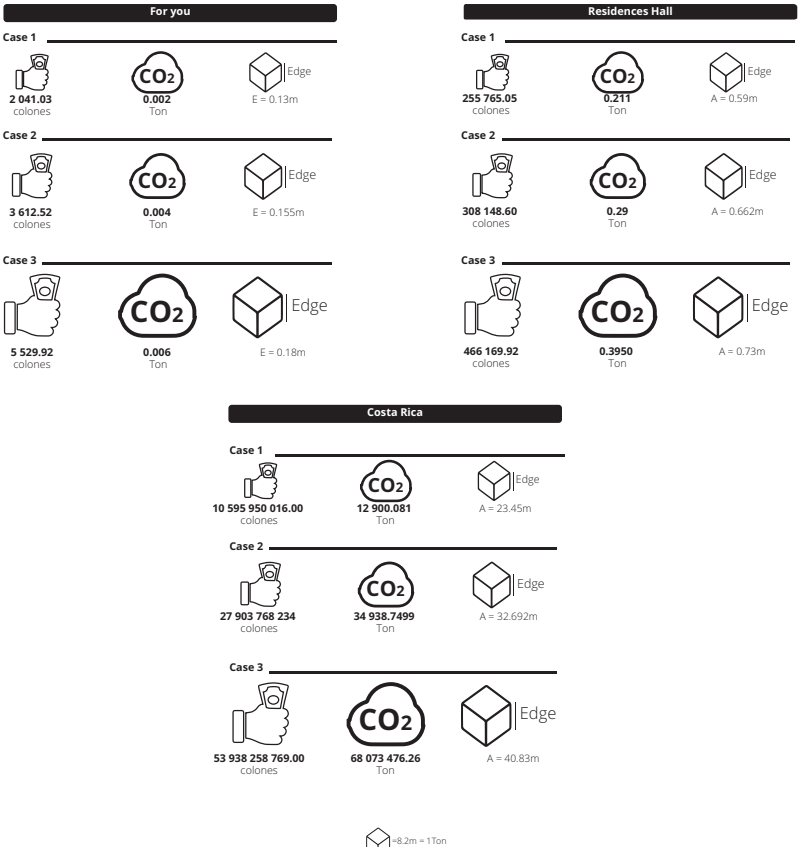


Fig. 4. Last screen comparison

S12. The abuse of the **elements that are used daily** and the contamination
S32. **Use of aerosols...**

Regarding the ways in which climate change can be mitigated, 18 out of 75 answers (24%) included the energy use or energy generation, as seen in the selection of answers shown below.

S1. **Not wasting energy**, do not pollute
S2. Trying to reduce the impact of the pollution. Reducing the energy use.
S16. Through the use of clean and renewable energy

In 49 answers participants mentioned climate change mitigate actions that refer to household activities. Actions requiring a modification on the way people perform activities is mentioned 20 times (40.82%). To raise awareness in people were mentioned 17 times (34.69%). Recycling were mentioned 12 times (24.49%). Some examples of the answers are shown next.

S75. By **improving the habits of energy use at home**, taking care of the forests, taking care of the water (change in the way people perform activities)
S15. Carry out reforestation campaigns, **raise awareness with people to help reduce pollution** (raise the awareness)
S42. To plant trees. To use wood. Recycling immersed in the 4R (recycling/4R's).

5.2 Participants perceptions about causes of climate change and lack of efficient use of energy before and after the multimedia intervention

To compare the change of perceptions of causes of climate change and inefficient use of energy we only use answers from the participants that completed the complete study, i.e., pretest, activity and posttest (n=30).

Participants perceptions can be divided in two categories: natural (2.86% on pretest and 4.65% on posttest) and anthropogenic (97.14% on pretest and 95.35% on posttest). Natural causes increased from pretest to posttest by 1.79%. Natural causes are used to indicate that climate change is a result of a natural process of the planet. Participants that included nature as a cause of climate change also mentioned the human being as a cause. For example, participant 22 indicated that natural and industrial activities are the causes of climate change.

> S22. In part, it is a **natural process** of the earth as was the ice age, but on the other hand humans and their **industrial activities** are accelerating this process.

Answers categorized as anthropogenic included all direct or indirect human activities, for instance, an answer included in this category is

> S9. The main causes of climate change are deforestation, **extensive cattle ranching** and burning **(use) of hydrocarbons**.

Mentioned consequences of human activities where quite varied as it can be seen in Table 1. Participants answers mentioned more often terms related with human behavior and knowledge in the posttest. For instance, lack of awareness and ignorance about how human activities impact the environment were mentioned as the second most mentioned cause in the posttest. Participants believed that people do not want to behave in a proenvironmental way or they need more information. Terms related with misuse of energy have increased their frequency of appearance in the posttest. On the other hand, general unaccountable terms such as pollution and change in the environment decreased by approximately 7% from pretest to the posttest.

Table 1. Classification of participant's answers regarding their perception of anthropogenic causes of climate change

Key words in answers	Pretest (%)	Posttest (%)
Pollution	**31.43**	**24.42**
Change in environment	**8.57**	**1.16**
Human activity	0.00	1.16
Industry	4.29	5.81
Deforestation	7.14	9.30
Livestock	2.86	3.49
Use of hydrocarbons	**8.57**	**1.16**
Economy	1.43	4.65
Development and use of products	4.29	1.16
Energy use	**0.00**	**1.16**
Transportation	0.00	1.16
Agriculture	0.00	1.16
Lack of awareness / ignorance	**8.57**	**20.93**
Consumerism	1.43	3.49
Misuse of resources	**11.43**	**4.65**
Misuse of energy	**1.43**	**4.65**
Human being	2.86	5.81
Overpopulation	2.86	0

One interesting fact about the participants answers is that just 2 out 30 mentioned themselves as a cause of climate change in the pretest. Examples of answers are the following

> S17. The misuse of the waste of raw material that **we** humans produce (pretest)
> S.24. I think that the main cause of climate change is the attitude that we have with the relationship to this, since in most of the cases we do not know the real data of what is happening, which causes little interest in the people to make a change in Their way of acting (posttest)

All other responses were written in third person (they, people, humans, population), such as the ones shown next

> S21. Pollution. **Population growth**. Development of technology
> S24. It is mainly given by **human** causes, I mean, **human activity**, like felling of trees, burning of fossil fuels

Participant S24 was the only one who changed from a third person answer in the pretest to first person answer in the posttest.

5.3 Participants perceptions about ways of mitigating climate change before and after the multimedia intervention

Participants' were asked about ways in which they can climate change can be mitigated. Answers can be classified in three categories: protecting the environment (17.33% on pretest and 20.99% on posttest), energy use and generation (17.33% on pretest and 17.28% on posttest) and improvements to current processes (65.33% on pretest and 61.73% on posttest).

Answers related with environment protection mentioned mainly wildlife and water sources conservation, reforestation and similar ideas. There were a group of answers that refer directly to energy generation and efficiency, e.g.,

> S2. Trying to reduce the impact of pollution. Reducing the use of energy

The majority group of answers mentioned actions that have a change in human behavior such as efficient transportation, increment of awareness, policies and government, reduce, reuse, recycle and control on pollution. Examples of each of the improvements to current situation are:

S4. It can be mitigated through reforestation, using the fewest possible hydrocarbons and having a **better control with respect to extensive livestock** (modification of human activities)
S13. Stop making fires. **Avoid using the car too much** (transportation)
S25. With a **different attitude, an attitude of change**. Making good use of resource, recycling, **reuse, reduce**, preventing pollution (increment of awareness and 4R's)
S3. Sources are already identified; the thing is if **that all nations decide** to truly implement drastic changes in those sources (policies and government).
S1. Avoiding the waste of energy and do not pollute (control on pollution)

Table 2 shows the key words used in the answers regarding to mitigation of climate change. The occurrence of answers related with control on pollution decreased by 14.02% from the pretest to the posttest. The answers that related increment of awareness as a way to mitigate climate change was the most frequent in the posttest.

Table 2. Classification of participant's answers regarding their ideas to mitigate causes of climate change

Key words in answers	**Pretest (%)**	**Posttest (%)**
Control on pollution	**22.67**	**8.64**
Reduce, Reuse, Recycle, Recreate	5.33	8.64
Increment awarness	**20.00**	**25.93**
Transportation	5.33	7.41
Modification on human activities	5.33	3.70
Energy sources	9.33	7.41
Energy savings and efficiency	8.00	9.88
Reforest	9.33	7.41
Protect water sources	**4.00**	**13.58**
Protect wildlife	4.00	0.00

Pretest answers include 3 out of 30 answers where participants write in first person (we, I), e.g.,

S15. Practices such as recycling. Increase and encourage more "green" cities to allow us to have fresher air. Decrease the use of vehicles and migrate to transports eco-friendlier and for group use. Set priorities among our communities and the well-being of the planet
S22. Climate change can be lessened if humans organize to do so, because if one part acts and the other not in the end we will all suffer from the consequences of the debauchery of those who did not act. It can be mitigated: foresting, using clean energy, creating protected areas, consuming only what is necessary (eliminating consumer culture).
S24. With ways that us, humans, can take, like: better manage trash (recycle), use renewable energy, care for water, reduce energy expenditure.

Posttest results shows that 10 answers are written using first person, such as the following

S4. Making changes in our daily routine, to reduce our energy consumption and thereby reduce the amount of CO2 we produce.
S10. Reducing the consumption of resources, whether energetic such as petroleum derivatives, give a more appropriate use of water resources. Also, letting people know that we have to reduce our consumption for the good of the future

Participants did not include daily routines activities as a way of mitigating climate change in the pretest. Three participants included daily routines in the posttest as shown next

S4. ...Making changes in our daily routine, in order to reduce our energy consumption and thereby reduce the amount of CO2 we produce.
S21. Everything starts with small routine changes.
S28. Adopting saving behaviors, changing the normal bulb to a low-power bulb, disconnecting unused electronics, and reforesting and recycling.

6 Discussion

The answers of participants related to the causes and mitigation actions for climate change were mainly general and in a macro level. Nevertheless, participants were found to have an average knowledge on the topic of energy efficiency and environmental problems associated to this topic. Perceptions were also on the "average" level. Both and perceptual answers and answers pertaining to their level of knowledge given by the participants fit into the macro level perspective. This indicated that more work must be done in the society to increase the awareness and understanding of the real impact of their behaviors on the environment.

The multimedia activity designed to create awareness had a minor impact on participants answers. After the multimedia intervention, participants reduced the percentage of macro level perspectives and increase the percentage in the micro level. The percentage of macro level causes in pretest is 74.30% and 58.12% for posttest. The percentage of micro level causes in pretest is 25.72% and 41.85% for posttest.

A macro level answer is linked with an external perspective of a situation, which seems to be the case for this study given that just 4 out of 60 answers (pretest and posttest) were written in first person plural (we, us, all of us). No answers were written in first person (I). The aforementioned situation also reflects that participants do not see themselves as direct responsible of energy misuse. The multimedia activity were able to slightly change that perception, specially when the participants seem to assume a more active role when they proposed mitigation activities. In this case, 33% of the answers use the first person.

Results also suggest the use of technical information on interventions to promote efficient energy use should be handled carefully, as it may create confusion or disinterest in the intervention. Conversions from intangible measures to tangible measures could also help to increase awareness and knowledge in the participants.

The conceptual understanding related with the climate change, energy consumption and energy efficiency among participants represented (in general) the most important determining characteristics about their resultant behavior. However, these finding may not be generalized to the majority Costa Rican population. In part, the participants were students of an undergraduate program including Environmental Engineering and Electronic Engineering—programs that cover topics of energy and environment in depth.

The minimal incorporation in the answers of first person plural or singular (we, us, I) reinforces the importance of showing to the population the impact our daily routines have on the environment. It also suggests the importance of being aware of the widespread consequences, be it economical or to society, the country or the world in general. Feedback technologies, including smart meters, could help to show the impact of each activity and the relationship activity-time of the day.

Visualizations of the data should also be carefully designed and tested before introduction to the larger population. This is in order to make sure that users are understanding the feedback and can modify their behavior in a positive way. The conversion from non-tangible information (kWh, CO2, peak of consumption, and others) to tangible or more understandable information is highly important. The design of this kind of visualization requires the test of theories and approaches that try to explain a behavioral change. Visual feedback mechanism derived from this work can be specially useful for the design of smart energy meters or energy apps.

In the current study, knowledge and perceptions were included in order to have a larger amplitude of the current situation and how the promotion of the

pro- environmental behavior should be completed. More variables should be included in order to better understand and explain the variation in behavior, i.e. context, desires, past and current behavior and personality of the participants. Data about the energy consumption is the most reliable method to determine if participants behave differently during and after the intervention. For future interventions measures of energy consumption combined with surveys can lead to a better understanding of the behavior.

To get institutions, government and communication media provide technical and non-technical information to the people. Effective policies and interventions requires not only experts' knowledge. General public perceptions and concerns are needed Experts knowledge and general public knowledge can differ.

References

1. V.M. Barthelmes, R. Li, R.K. Andersen, W. Bahnfleth, S.P. Corgnati, and C. Rode. *Profiling Occupant Behaviour in Danish Dwellings using Time Use Survey Data - Part I: Data Description and Activity Profiling*, pages 97–102. 2018.
2. Olivier Damette, Philippe Delacote, and Gaye Del Lo. Households energy consumption and transition toward cleaner energy sources. *Energy Policy*, 113:751–764, 2018.
3. ITU-T FG-SSC. Technical report on smart sustainable cities: An analysis of definitios. Technical report, International telecommunication union (ITU-T), focus group on smart sustainable cities. United Nations, 2014.
4. Gerald T. Gardner. The short list: The most effective actions u.s. households can take to curb climate change. *Environment*, 50(5):12–26, September 2008.
5. Kathryn B Janda. Buildings don't use energy: people do. *Architectural science review*, 54(1):15–22, 2011.
6. Richard E Mayer. Multimedia learning (2nd), 2009.
7. Chen Peng, Da Yan, Ruhong Wu, Chuang Wang, Xin Zhou, and Yi Jiang. Quantitative description and simulation of human behavior in residential buildings. *Building Simulation*, 5(2):85–94, Jun 2012.
8. Lee Schipper, Sarita Bartlett, Dianne Hawk, and Edward Vine. Linking life-styles and energy use: a matter of time? *Annual review of energy*, 14(1):273–320, 1989.
9. Heather Barnes Truelove and Ashley Jade Gillis. Perception of pro-environmental behavior. *Global Environmental Change*, 49:175–185, 2018.
10. Heather Barnes Truelove and Craig Parks. Perceptions of behaviors that cause and mitigate global warming and intentions to perform these behaviors. *Journal of Environmental Psychology*, 32(3):246–259, 2012.
11. W Fred Van Raaij and Theo MM Verhallen. A behavioral model of residential energy use. *Journal of economic psychology*, 3(1):39–63, 1983.
12. Madhavi Venkatesan. *Promoting Sustainability: The Role of Smart Cities*, pages 489–505. Springer International Publishing, Cham, 2018.
13. Lorraine Whitmarsh. Behavioural responses to climate change: Asymmetry of intentions and impacts. *Journal of environmental psychology*, 29(1):13–23, 2009.

Intelligent Flexibility Management for Prosumers: Development of Algorithms for the Energy Management of Electric Vehicles, Loads, Generators and Batteries

Sara Barja-Martínez[1], Pol Olivella-Rosell[1], Pau Lloret-Gallego[1], and Roberto Villafáfila-Robles[1]

Centre d'Innovació Tecnològica en Convertidors Estàtics i Accionaments (CITCEA-UPC), Departament d'Enginyeria Elèctrica, ETS d'Enginyeria Industrial de Barcelona, Universitat Politècnica de Catalunya, Avinguda Diagonal, 647, Pl. 2, 08028 Barcelona, Spain,
sara.barja@upc.edu.

Abstract. Cities nowadays face multiple challenges, among which energy efficiency of homes, how to cope with the increasing presence of the vehicle and small-scale renewable energies penetration in the grid are a the most outstanding. A new way to manage and generate electricity is needed, and this will be possible by transforming current cities into smart ones. This study focuses on intelligent households that are managed by the Home Energy Management System. This software plays a critical role in giving a flexibility service to the electric system, since it allows an automatic control of the small renewable generators and the controllable devices that use energy in the home, with the objective of minimizing the prosumer electricity bill. Two scenarios are considered; the first one aims to explain the Home Energy Management System behaviour optimizing the electricity bill of one prosumer. The second one analyzes the behavior of a group of prosumers that optimize their energy bill individually, and how this affects the electricity distribution system.

Keywords: Prosumer, Flexibility, Energy Management System, Smart Cities

1 Introduction

Emission of greenhouse gases and their effects on climate change have become a matter of serious concern all over the world, and cities will play an important role in this issue: due to the high population density, they are intensive centers of electricity consumption. Also, the increase of small-scale renewable energies and the drawback of their variability and volatility along with the electric vehicles (EV) will also condition the energy future. That is why an energy transition is necessary, and maximizing the energy efficiency of homes and residential dwellings and transform them into smart ones are a major priority.

Recent researches have provided the tools for modernizing the traditional grid into a smart one, which objective among others is to coordinate an ever-growing number of intelligent devices, electric vehicles and renewable sources, each with their own objectives and value perspectives, into a resilient, secure, and efficient system.

Here is were the flexibility concept plays an important role in the upcoming energy transition, understanding flexibility as the ability to change certain previously defined parameters in order to fit new requirements.

1.1 Home Energy Management System state-of-art

A Home Energy Management System (HEMS) research has been made to know the state-of-art of this technology. Also, different ways of approaching the HEMS objective function are exposed.

In the foreseeable future, the smart grid challenge is to figure out how to coordinate an increasingly number of intelligent homes, each one of them with their respective smart devices and own objective and comfort levels, into a resilient, secure and efficient energy system [12]. Hereunder, a research has been made to get to know the state-of-art of HEMS technology in smart households nowadays.

The vast majority of literature presents the HEMS algorithm as an automated decision-maker technology. According to Beaudin and Zareipour [2], a HEMS is a demand response tool that shifts and curtails demand to improve the energy consumption and production profile of a house according to electricity price and consumer comfort.

An intelligent HEMS includes a controller, an in-home display and a set of smart appliances and smart meters [10]. These last ones are connected (wired or wireless) to the HEM controller. An analysis of functionality, quality and behavior of 308 HEMS smart appliances is outlined in [7]. In addition, a security analysis of an advanced metering infrastructure has been evaluated by Hansen, Staggs, and Shenoi [9], where possible targets and attacks to these appliances and their consequences are described. Zafar et al. [25] reviews the HEMS communications technologies as well as the most relevant optimization techniques, along with future associated challenges.

The objective function of a HEMS model can be focused on different aspects under different perspectives. For instance, it depends on what flexibility services are demanded. Olivella-Rosell et al. [14] explains in detail the different flexibility customers and what kind of flexibility services they demand. Flexibility customers are mainly the Distribution System Operator (DSO), the Balance Responsible Party (BRP) and prosumers. Prosumer means a customer who consumes, stores or sells electricity generated on their premises, including through aggregators, or participate in demand response or energy efficiency schemes provided that these activities do not constitute their primary commercial or professional activity ([6])

The DSO flexibility services are focused on preventing grid overloads, BRP aims to compensate energy deviations and prosumers seek to reduce electricity

bill individually with the minimum sacrifice in the dwelling comfort. Olivella-Rosell et al. [15] objective function minimizes the operation cost for the aggregator in order to meet the DSO request of flexibility. Sattarpour, Nazarpour, and Golshannavaz [21] proposes a multi-objective function that pursuits two objectives: a minimum energy payment cost of home appliances and an attempt to flatten the load profile, so home owners could effectively assists the DSO. Even though this last objective function does not directly benefit the end-user, the DSO could handle the upstream network operation and end up in higher economic savings, which are fairly divided between the DSO and the end-users through a signed contract. Elma and Selamogullari [5] suggests to reduce peak demand thanks to voltage control, which allows to reduce the power consumption of residential controllable appliances. [10] aims to minimize electricity cost and Peak-to-Average Ratio by optimal usage of power from grid. Grid capacity (kW) should not be exceeded. Total energy cost is reduced by shifting load from on-peak hours to off-peak hours. Algorithm proposed by Pipattanasomporn, Kuzlu, and Rahman [17] focuses on managing household power intensive appliances in order to keep the household power consumption below a specified demand limit level (kW): The HEMS receives a external signal by the DSO/BRP, which includes demand curtailment request and duration. These intensive appliances are: space cooling unit, electrical water heater (EWH), clothes dryer and EV; moreover home-owners can set their load priority and comfort preference.

Shakeri et al. [22] proposes a cost function where grid power is reduced as minimum as possible, prioritizing self photo-voltaic (PV) production, in order to optimize the electricity consumption cost. Hence, the proposed algorithm limits the maximum power we can drain from the grid. A thermal model of the building is defined in [8]: customer's preferences are a priority for the HEMS along with minimizing the daily cost of energy. Two cost functions are formulated: one as a Price-Based program (PBP) and the other as an Incentive-Base Program (IBP). In a IBP, a financial incentive is given for each kWh of consuming below the baseline load. On the other hand, the customer is charged for each kW of the daily peak demand. Selling electricity to the grid at variable prices is also considered in the final cost function. This optimization problem requires technical data of EWH and EVs, outdoor temperature, and consumers' hot water demand as inputs. A multi-objective model predictive control is explained by Jin et al. [11], wherein the objectives consist in minimize energy cost, keep thermal comfort within agreed values, maximize the user convenience by not delaying too much cycles of scheduled appliances, and reduce carbon emission, penalizing the loss of CO_2 reduction by curtailing the on-site PV generation and back-feeding the PV power to the grid. User ranks the electrical appliances services to indicate relative preferences. Nguyen, Nguyen, and Le [13] considers the Real Time Pricing (RTP) scheme and solar radiance with uncertainty, consequently a rolling optimization is propose to solve the objective function. Moreover, a solar collector is taken into account in order to transform solar energy into thermal energy for the water heater. In addition, heating ventilation and air conditioning (HVAC) transfers heat into the water tank by circulating a refrigerant through

a cycle of evaporation and condensation. The objective is to focus on the control of the solar assisted HVAC and water heating system. R. Jovanovic [19] takes the preferences of participating households into account and aims to minimize the overall production cost and, in parallel, to lower the individual electricity bills. Pombo, Murta-Pina, and Pires [18] develops a multi-objective formulation that aims to find the optimal number and location of switches and the optimal location, number and size of the battery banks. Silva and Hendrick [23] centers his work in optimizing PV and lithium-ion storage installations, through real households data. An economic analysis of the energy system, named Levelised Cost of Energy (LCOE), is formulated and used.

1.2 Outline of the paper

This work is organized as follows: Section 2 outlines the mathematical problem formulation. The case studies definition are defined in Section 3, while Section 4 shows the results of the case study. Ultimately, conclusions are presented in Section 5.

2 Mathematical problem formulation

This section formulates and explains the mathematical problem of the different available flexibility sources in the households. These models are based on the INVADE project [1]. Once the flexible models have been described, it is proceed to formulate the entire HEMS model, which will cover all the flexibility sources models along with the prosumer flexibility service constraints, which include the market tariff restrictions.

2.1 Electric vehicles constraints

The EV flexible model applied in this study allows to control and interrupt the charging session, that is to say, we are able to delay and control the charging process by reducing power levels or interrupting the charging session. The final charging profile $\phi_{t,v}^{ch}$ can be shaped in a different way than baseline in order to give a flexibility service. We can control the power levels between a minimum $E_v^{min,ev}$ and a maximum $E_v^{max,ev}$ power value, where $\phi_{t,v}^{ch}$ can take either the value 0 or between these lower and upper bounds. Since $E_v^{max,ev}$ has power units, it must be divided by N, the number of time intervals in which an hour is divided:

$$\frac{E_v^{min,ev}}{N} \leq \phi_{t,v}^{ch} \leq \frac{E_v^{max,ev}}{N} \quad OR \quad \phi_{t,v}^{ch} = 0 \qquad \forall\ v \in V^v, i \in I^{ev}, t \in T \tag{1}$$

For each EV shift interval i, the sum energy volume delivered to the vehicle unit must equal the sum of the baseline forecast:

$$\sum_{t=T_{i,v}^{start,ev}}^{T_{i,v}end,ev} \phi_{t,v}^{ch} = \sum_{t=T_{i,v}^{start,ev}}^{T_{i,v}end,ev} W_{t,v}^{ev} \qquad \forall\ v \in V, i \in I^{ev}, t \in [T_{i,v}^{start,ev}, T_{i,v}^{end,ev}) \tag{2}$$

For shiftable volume electric vehicles, we introduce the concept of weighted average delay. It takes into account not only when you meet the finale energy volume, but also how you do it: it is penalized more if large volumes of energy are shifted far away from the baseline. The weighted average delay for charging point v and EV shift interval i is defined as:

$$\tau_{i,v}^{ev} = \frac{\sum_{t=T_{i,v}^{start,ev}}^{T_{i,v}end,ev} ((\phi_{t,v}^{ch} - W_{t,v}^{ev}) \cdot K_{i,v,t}^{aux,ev})}{\sum_{t=T_{i,v}^{start,ev}}^{T_{i,v}end,ev} W_{t,v}^{ev}} \qquad \forall\ v \in V, i \in I^{ev} \tag{3}$$

Since this weighted average delay also may be negative (by shifting volume backwards), a new variable $\rho_{i,v}^{ev}$ is introduced, defined as:

$$\rho_{i,v}^{ev} \geq \tau_{i,v}^{ev} \qquad \forall\ v \in V, i \in I^{ev}, t \in [T_{i,v}^{start,ev}, T_{i,v}^{end,ev}) \tag{4}$$

$$\rho_{i,v}^{ev} \geq -\tau_{i,v}^{ev} \qquad \forall\ v \in V, i \in I^{ev}, t \in [T_{i,v}^{start,ev}, T_{i,v}^{end,ev}) \tag{5}$$

The total cost for shifting volume interruptible EV is:

$$\zeta^{ev} = \sum_{i \in I^{ev}} \sum_{v \in V} P_v^{ev} \cdot \rho_{i,v}^{ev} \qquad \forall\ v \in V, i \in I^{ev} \tag{6}$$

2.2 Energy Storage System constraints

Batteries are one of the keys to provide flexibility since they can supply up and down regulation by discharging or charging storage units. It can be said that batteries make easier to follow the variable and flashing renewable generation.

With the aim to represent a real and accurate model, the mathematical formulation has into account efficiency factors for storing and delivering electricity.

The variable $\sigma_{t,b}^{soc}$ serves to know the current energy state of a battery in use. The following equation 7 formulates the battery behaviour:

$$\sigma_{t,b}^{soc} = \sigma_{t-1,b}^{soc} + \sigma_{t,b}^{ch} \cdot A_b^{ch} - \frac{\sigma_{t,b}^{dis}}{A_b^{dis}} \qquad \forall b \in B, t \in T \tag{7}$$

The initial and final state of charge are defined

$$\sigma_{t,b}^{soc} = \sigma_b^{socinit} \qquad \forall b \in B, t = 0 \tag{8}$$

$$\sigma_{t,b}^{soc} = \sigma_b^{socend} \qquad \forall b \in B, t = T \tag{9}$$

In order to preserve the battery life-time [3], the state of charge must be between a minimum O_b^{min} and a maximum O_b^{max} energy limit value that can not be exceeded:

$$O_b^{min} \leq \sigma_{t,b}^{soc} \leq O_b^{max} \qquad \forall b \in B, t \in T \tag{10}$$

Equations 11 and 12 limit the maximum energy charged and discharged by battery per period.

$$\sigma_{t,b}^{ch} \leq \frac{Q_b^{ch}}{N} \qquad \forall b \in B, t \in T \tag{11}$$

$$\sigma_{t,b}^{dis} \leq \frac{Q_b^{dis}}{N} \qquad \forall b \in B, t \in T \tag{12}$$

The following constraint makes sure that the energy charged $\sigma_{t,b}^{ch}$ is linearly decreased.

$$\sigma_{t,b}^{ch} \leq \frac{-Q_b^{ch}}{1 - S_b^{ch}} \cdot \left(\frac{\sigma_{t,b}^{soc}}{O_b^{max}} - 1\right) \qquad \forall b \in B, t \in T \tag{13}$$

The same happens for discharging energy. The lower threshold to limit the energy output is S_b^{dis}.

$$\sigma_{t,b}^{dis} \leq \frac{Q_b^{dis}}{S_b^{dis}} \cdot \frac{\sigma_{t,b}^{soc}}{O_b^{max}} \qquad \forall b \in B, t \in T \tag{14}$$

Battery degradation [24] is an important issue to have in mind. In this formulation, the degradation cost for charging, shown in equation 15, is taken into account. The discharged degradation cost is already included in the charging process. To set this constant cost, the rainbow algorithm developed by [24] is used as a basis.

$$\zeta^{bat} = \sum_{t \in T} \sum_{b \in B} P_b^{b,ch} \cdot \sigma_{t,b}^{ch} \qquad \forall b \in B, t \in T \tag{15}$$

2.3 Load unit constraints

Loads can be uncontrolable, as inflexible load units, or controllable. This work focues on the flexible appliances. The characteristics of each one of the load models will be explained below.

Inflexible load unit These appliances are uncontrollable loads and they are supposed to run with the highest priority and without any delay. Typically, inflexible appliances include fridge, lights, TV, etc., which are considered as must run loads and can not be shifted to later hours or curtailed. These appliances do not participate in demand response [20].

$$\omega_{t,l}^{load,i} = W_{t,l}^{load,i} \qquad \forall \ l \in L^i, t \in T \tag{16}$$

Curtailable disconectable load unit In the present model, the baseline consumption is can be interrupted completely and no recovery is possible afterwards.

The equation 17 enunciates that a curtailment can not start, run and end at the same period:

$$\delta_{t,l}^{start,d} + \delta_{t,l}^{run,d} + \delta_{t,l}^{end,d} \leq 1 \qquad \forall\ l \in L^d, t \in T \tag{17}$$

A curtailment that starts or runs in one period, must either continue to run or end in the next period:

$$\delta_{t-1,l}^{start,d} + \delta_{t-1,l}^{run,d} = \delta_{t,l}^{start,d} + \delta_{t,l}^{run,d} \qquad \forall\ l \in L^d, t \in T \tag{18}$$

In the first period, $\delta_{t,l}^{run,d}$ and $\delta_{t,l}^{end,d}$ can never be set to 1, because $\delta_{t,l}^{start,d}$ must be activated first:

$$\delta_{0,l}^{run,d} = 0 \qquad \forall\ l \in L^d, t \in T \tag{19}$$

$$\delta_{0,l}^{end,d} = 0 \qquad \forall\ l \in L^d, t \in T \tag{20}$$

With the objective of maintaining the end-user comfort between certain levels, a load unit can not be curtailed any longer than $D_l^{max,d}$ periods,

$$\sum_{t+1}^{t+D_l^{max,d}} \delta_{t,l}^{end,d} \geq \delta_{t,l}^{start,d} \qquad \forall\ l \in L^d, t \in T \tag{21}$$

A minimum duration $D_l^{min,d}$ must exist between two load curtailments. The present constraint has also to do with the prosumer comfort:

$$\delta_{t,l}^{end,d} + \sum_{t+1}^{t+D_l^{min,d}} \delta_{t,l}^{start,d} \leq 1 \qquad \forall\ l \in L^d, t \in T \tag{22}$$

For disconnectable loads units, the load schedule that has been curtailed $\chi_{t,l}^{load,d}$ must be either 0 or equal to the baseline profile.

$$\chi_{t,l}^{load,d} = (\delta_{t,l}^{start,d} + \delta_{t,l}^{run,d}) \cdot W_{t,l}^{load,d} \qquad \forall\ l \in L^d, t \in T \tag{23}$$

The final amount of electricity consumed $\omega_{t,l}^{load,d}$ from load l during period t is:

$$\omega_{t,l}^{load,d} = W_{t,l}^{load,d} - \chi_{t,l}^{load,d} \qquad \forall\ l \in L^d, t \in T \tag{24}$$

The cost for curtailing the appliances consumption is formulated as follows:

$$\zeta^{load,d} = \sum_{t \in T} \sum_{l \in L^d} P_l^{load,d} \cdot (\delta_{t,l}^{start,d} + \delta_{t,l}^{run,d}) \qquad \forall\ l \in L^d, t \in T \tag{25}$$

Curtailable reducible load unit These load units can be reduced down to a certain level without switching off. The approach is the same as in the curtailable disconnectable load units, except the following constraint:

$$\chi_{t,l}^{load,r} \leq (\delta_{t,l}^{start,r} + \delta_{t,l}^{run,r}) \cdot W_{t,l}^{load,r} \qquad \forall\ l \in L^r, t \in T \tag{26}$$

The cost for reducing the power of the appliances is formulated as follows:

$$\zeta^{load,r} = \sum_{t \in T} \sum_{l \in L^r} P_l^{load,r} \cdot (\delta_{t,l}^{start,r} + \delta_{t,l}^{run,r}) \qquad \forall\ l \in L^r, t \in T \tag{27}$$

Shiftable profile load unit The total load must always be met, but it may be moved within a given time interval. Consumption is postponed, but keeping the same baseline profile.

A three dimension variable $\gamma_{i,l,n}$ is introduced, which is set to 1 if consumption for load unit l is shifted n periods for load shift interval i. Exactly one load shifting option must be selected for each shiftable profile load unit l in each load shift interval i,

$$\sum_{n=T_{i,l}^{start,p}-V_{i,l}^{start,p}}^{T_{i,l}^{end,p}-V_{i,l}^{end,p}} \gamma_{i,l,n} = 1 \qquad \forall\ l \in L^p, i \in I^p, t \in T \tag{28}$$

The consumption forecast must be allocated to the correct periods according to the decided load shifting option

$$\begin{aligned} \omega_{t,l}^{load,p} = & \sum_{n=0}^{T_{i,l}^{end,p}-T_{i,l}^{start,p}} \gamma_{i,l,(t-T_{i,l}^{start,p}-n)} \cdot W_{(T_{i,l}^{start,p}+n),l}^{load,p} \\ & \forall l \\ & \in L^p, i \\ & \in I^p, t \\ & \in [T_{i,l}^{start,p}, T_{i,l}^{end,p}) \end{aligned} \tag{29}$$

The cost for shifting a load is the product of the delay cost and the number of period delayed. We calculate this cost according to the equation below:

$$\zeta^{load,p} = \sum_{i \in I^p} \sum_{l \in L^p} P_l^{load,p} \sum_{n=0}^{T_{i,l}^{end,p}-V_{i,l}^{end,p}} \gamma_{i,l,n} \cdot n \qquad \forall\ l \in L^p, i \in I^p, t \in [T_{i,l}^{start}, T_{i,l}^{end}) \tag{30}$$

Shiftable volume load unit This flexible model follows exactly the same EV model equations, already explained before.

For each load shift interval i the sum energy volume delivered to the load unit must equal the sum baseline forecast:

$$\sum_{t=T_{i,l}^{start,v}}^{T_{i,l}^{end,v}} \omega_{t,l}^{load,v} = \sum_{t=T_{i,l}^{start,v}}^{T_{i,l}^{end,v}} W_{t,l}^{load,v} \qquad \forall\ l \in L^v, i \in I^v, t \in [T_{i,l}^{start,v}, T_{i,l}^{end,v}) \tag{31}$$

The total cost for shifting volume interruptible load is as follows:

$$\zeta^{load,v} = \sum_{i \in I^v} \sum_{l \in L^v} P_l^{load,v} \cdot \rho_{i,l}^{load} \qquad \forall\ l \in L^v, i \in I^v \tag{32}$$

2.4 PV generation constraints

Two types of PV generation models are considered.

PV disconnectable generation The scheduled production must be either 0 or equal to predicted production $W_{t,g}^{gen,d}$:

$$\psi_{t,g}^{gen,d} = \delta_{t,g}^{gen,d} \cdot W_{t,g}^{gen,d} \qquad \forall\ g \in G^d, t \in T \tag{33}$$

The cost $P_g^{gen,d}$ depends on the amount of energy that has been curtailed. Since renewable energy and self-consumption is a high priority, this cost for disconnecting the PV generation should be very high, so HEMS will never disconnect it as a first option.

$$\zeta^{gen,d} = \sum_{t \in T} \sum_{g \in G^d} P_g^{gen,d} \cdot (W_{t,g}^{gen,d} - \psi_{t,g}^{gen,d}) \qquad \forall\ g \in G^d, t \in T \tag{34}$$

PV reducible generation Scheduled production must be between 0 and predicted production:

$$0 \leq \psi_{t,g}^{gen,r} \leq W_{t,g}^{gen,r} \qquad \forall\ g \in G^r, t \in T \tag{35}$$

The total cost for reducing generation volume is:

$$\zeta^{gen,r} = \sum_{t \in T} \sum_{g \in G^r} P_g^{gen,r} \cdot (W_{t,g}^{gen,r} - \psi_{t,g}^{gen,r}) \qquad \forall\ g \in G^r, t \in T \tag{36}$$

2.5 HEMS objective function

Prosumers can purchase and sell energy from/to the grid. The objective is to minimize the electricity bill of each prosumer individually without incurring in a high discomfort for the end-user. The objective function formulated in equation 37 has into account the total cost of buying electricity from the grid, the revenues for selling electricity back to the grid and the discomfort cost for activating flexibility.

$$min \;\; o.f. = \sum_{t \in T} (P_t^{retail,buy} \cdot \chi_t^{buy}) \cdot P^{taxes} - \sum_{t \in T} (P^{retail,sell} \cdot \chi_t^{sell}) + discomfort \tag{37}$$

The discomfort term is the total cost for using the flexibility from the house internal resources. This cost covers a wide variety of costs, such as: loss of comfort from shifting and curtailing loads and dis-utility from delaying EV charging session:

$$discomfort = \zeta^{bat} + \zeta^{ev} + \zeta^{gen,d} + \zeta^{gen,r} + \zeta^{load,d} + \zeta^{load,r} + \zeta^{load,p} + \zeta^{load,v} \tag{38}$$

2.6 Market tariff constraints

The total electricity imported from the grid χ_t^{buy} and the total electricity exported to the grid χ_t^{sell}, must balance the production from generation units, consumption from load units, charging and discharging batteries and EV charging sessions for each period of time $t \in T$:

$$\begin{aligned} &\sum_{g \in G^d} \psi_{t,g}^{gen,d} + \sum_{g \in G^r} \psi_{t,g}^{gen,r} + \sum_{b \in B} \sigma_{t,b}^{dis} + \chi_t^{buy} \\ &= \chi_t^{sell} + \sum_{b \in B} \sigma_{t,b}^{ch} + \sum_{v \in V} \phi_{t,v}^{ch} + \sum_{l \in L^d} \omega_{t,l}^{load,d} \\ &\quad + \sum_{l \in L^p} \omega_{t,l}^{load,p} + \sum_{l \in L^r} \omega_{t,l}^{load,r} + \sum_{l \in L^v} \omega_{t,l}^{load,v} \forall \;\; t \\ &\in T \end{aligned} \tag{39}$$

Binary variables δ_t^{buy} and δ_t^{sell} are now introduced in order to ensure that it is not possible to sell and buy electricity in the same period. They are set to 1 if the customer is buying (importing) or selling (exporting); else 0:

$$\delta_t^{buy} + \delta_t^{sell} \leq 1 \qquad \forall \;\; t \in T \tag{40}$$

Electricity bought and sold must be less or equal to the contracted power of each prosumer, according to the terms stipulated in the retail contract:

$$\chi_t^{buy} \leq \delta_t^{buy} \cdot X^{max,imp}/N \qquad \forall \;\; t \in T \tag{41}$$

$$\chi_t^{sell} \leq \delta_t^{sell} \cdot X^{max,exp}/N \qquad \forall \;\; t \in T \tag{42}$$

3 Case Studies

In this section the assumptions for a proper and realistic operation of the HEMS are defined along with the case studies definition.

Two case studies are presented. Restrictions and assumptions commonly found in both are described. The first case study aims to explain a simple scenario of a single prosumer that is allowed to buy and sell electricity to the grid, so the reader is able to understand and verify the operation of the HEMS easily. The second focuses on analyzing the behavior of a Local Energy Comunity (LEC) formed by ten prosumers, which will also aim at minimizing their total electric cost individually.

For the purpose of making the case studies as realistic as possible, real load and EV consumption and PV generation data from real dwellings is used as an input to the HEMS performance. These parameters are taken from DataPort database [4].

The temporal horizon used in the HEMS simulation is 24 hours. Each simulation time interval is 15 minutes long, making a total of 96 time-slots. In all case studies it is assumed that the starting period (t = 0) is at 6 am and it ends at 5:45 am of the following day. This schedule allows to shift a EV charging session at night and play with the low prices at that time.

The proposed two scenarios take place on July 22th of 2017, the hottest day of the year 2017. This day has been chosen since it is when the electricity consumption is higher, because of the use of air conditioning.

Batteries begin and end at approximately half their maximum capacity. This restriction is imposed because otherwise batteries would be completely discharged at the end of the time horizon, leaving them with no stored energy for the next day. Electric vehicles are just allowed to charge and each prosumer has its own PV panels.

The Spanish tariff market is applied in the HEMS simulation. The electricity tariff chosen for buying electricity from the grid is the PVPC tariff (Precio Voluntario para el Pequeño Consumidor): this price changes hourly and daily demanding on the balance of supply-demand between whoever is producing energy (the generation company) and whoever is selling this energy to consumers (retailers). All prosumers must have a contract power lower than 10 kW because of regulations. The PVPC hourly electricity prices used in this project (Figure 1) are real data from the day 22th-23th of July, from 06:00 am to 05:59 am of the following day.

It is necessary to establish a solid baseline to set the sale price of the electricity. The electricy price of the day-ahead market published by OMIE (Operador del Mercado Ibérico de Energía) [16] of the last two years has been used as reference in order to obtain an indicative electricity sale value (Figure 2). To avoid falling into euphoric results, we have chosen a sale electricity price a bit below the inter-annual average value.

Therefore, the price for selling energy P^{sell} is set in 4 c€/kWh and it is a constant value for all time slots and prosumers. Battery can also inject energy to the grid.

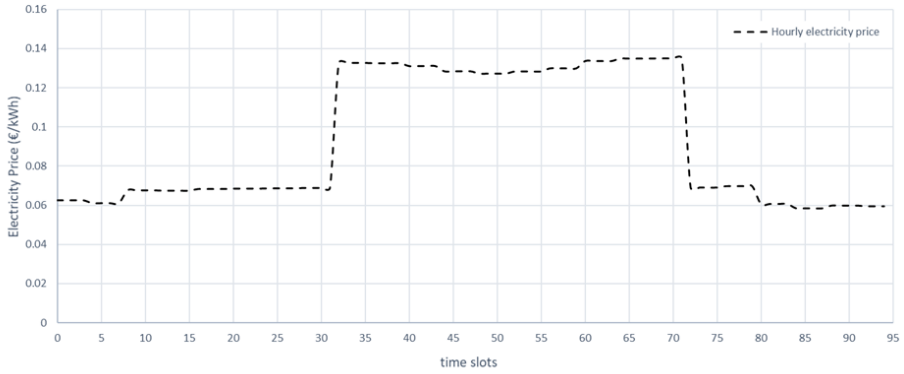


Fig. 1. PVPC tariff. Hourly electricity price (July 22th to 23th, 2017)

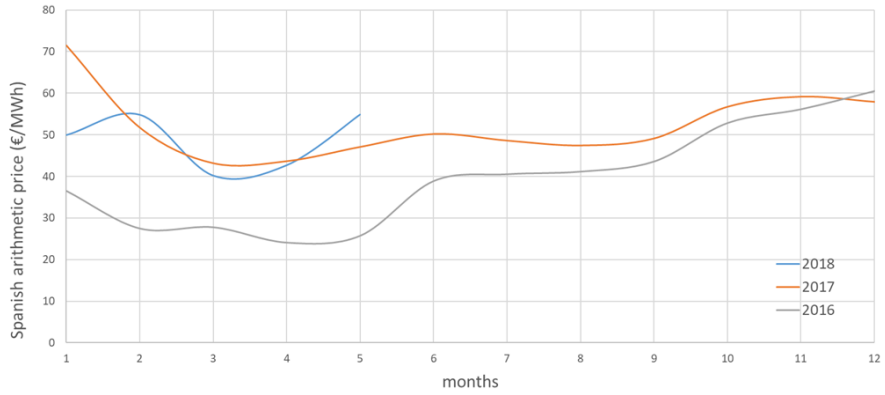


Fig. 2. Electricity price monthly average of the day-ahead Spanish market in the last two years

4 Results

This section demonstrates the applicability of the developed HEMS algorithm for residential customers. The results of the two case studies are presented.

4.1 Case Study 1: One prosumer

The solution was obtained with a computational time of 1,14793 seconds on a Laptop with a processor core i7 at 2,60 GHz and 8 GB of RAM.

The prosumer is allowed to sell electricity back to the grid in exchange for economic compensation, as well as buy when necessary to meet the optimal energy balance.

The the objective function solution is the minimized energy cost, which is showed in the following Table 1. Two cost are compared: Prosumer baseline energy cost versus the optimized total cost. It must be noted that the baseline cost do not have batteries in its system, just PV generation. This cost can be defined as the energy bill that the prosumer would have to pay if he had not flexible assets, having the same consumption and generation profile.

Table 1. One prosumer. Total cost comparison

	Baseline cost	Optimized cost	Electricity bill reduction
Prosumer	9,66 €	8.52 €	11.82 %

The HEMS results are displayed in Figure 3. The total amount of energy needed to be bought and sold, the PV generation, the battery performance and the total consumption (loads and EV) are shown. Let's take a look at the behavior of the battery: on the one hand, it discharges mostly during the highest energy prices periods. On the other, the battery charges when the electricity price is the cheapest and when there is a PV surplus of energy generation and instead of reducing that clean and cost-zero energy, the battery charges in order to inject electricity afterwards during the expensive price energy periods. Also, the largest purchase of energy occurs when there is no solar radiation.

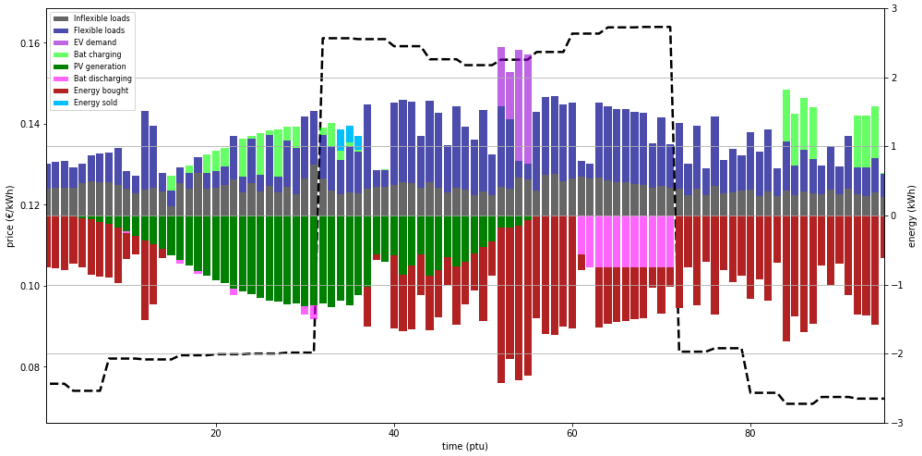


Fig. 3. HEMS detailed results

EV charging point profile has shifted and grouped its volume from expensive to a little less expensive periods. As it has been pointed out before, there is an associated shifting cost that has to do with the end-user discomfort. This is why

EV is not shifted further to period 72, where electricity is cheaper, because it would ultimately be more expensive due to EV charging session would have to be shifted at least 14 periods from the baseline. So EV charging point groups as much as possible the charging EV volume to the lower prices, without exceeding the maximum charging power: 8,8 kW.

From Figure 3 the following conclusions are drawn: It is noticeable that the total amount of energy sold is negligible. The entire electricity sold takes place after period 34, right at the moment when the battery reaches its maximum capacity: 10 kWh.. Battery can never exceed that maximum SOC in no case and under no circumstances: Figure 4 corroborates it.

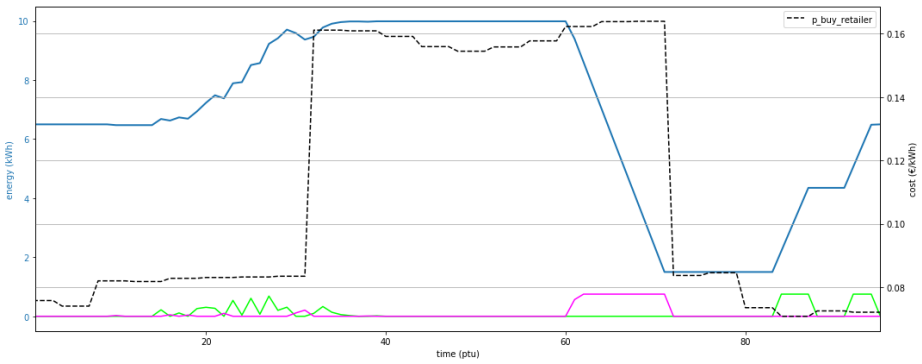


Fig. 4. HEMS battery performance

Total flexibility activated The total amount of flexibility activated by the flexible sources is represented in Figure 5. Positive flexibility means up regulation and negative, down regulation. That explanation is schematically summarized in Table 2.

Table 2. Flexibility definition

Positive Flexibility	**Negative Flexibility**
↑ generation	↓ generation
↓ consumption	↑ consumption
battery discharging	battery charging

Positive flexibility happens mainly during time intervals with high electricity purchase prices, on the other hand, negative flexibility occurs during low electricity prices. This make sense since prosumer aims to reduce his electricity bill, so the consumption decreases and instead of buying electricity to the grid,

batteries discharge in order to provide that energy needed to meet the energy balance.

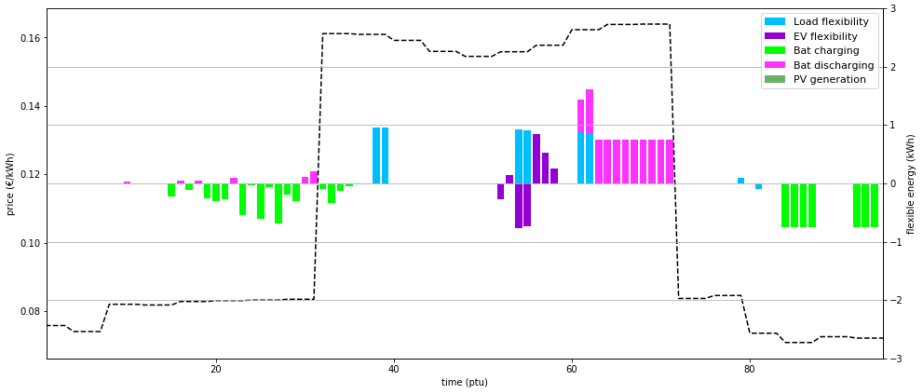


Fig. 5. HEMS total flexibility activated

4.2 Case Study 2: LEC

This case brings together 10 prosumers, all of them with EV, photovoltaic generation, two air conditioning units, batteries, flexible and inflexible loads. These ten prosumers form a LEC. The objective is to check the distribution grid behavior under the following condition: each prosumer wants to reduce its own electricity bill. In order to give that individual prosumer flexibility service, each house is optimized separately. Once all the individual results are obtained, they are all add up to have the total amount of energy purchased, sold, PV generation and batteries operation. The graphs will only show the sum total of all the individual household results.

The average reduction of the total cost of the total invoice for the LEC is shown in Table 3.

Table 3. LEC. Total cost comparison

	Baseline cost	Optimized cost	Electricity bill reduction
LEC	118,09 €	92,83 €	21,39 %

The following Figure 6 represents all the energy sources that provide electricity to the LEC: the total energy bought and sold from/to the grid, batteries performance and the total renewable photovoltaic generation. The total amount of electricity sold is negligible.

It is interesting to see how in the same period, some batteries charge and other discharge. This is due to many factors: battery capacity, consumption pattern, PV generation output power, etc. LEC batteries discharge mostly during the most expensive electricity price periods: from 60 to 71. Also, before reaching the end of the planning horizon, batteries take advantage to charge during electricity prices in order to finish with the same SOC that they started.

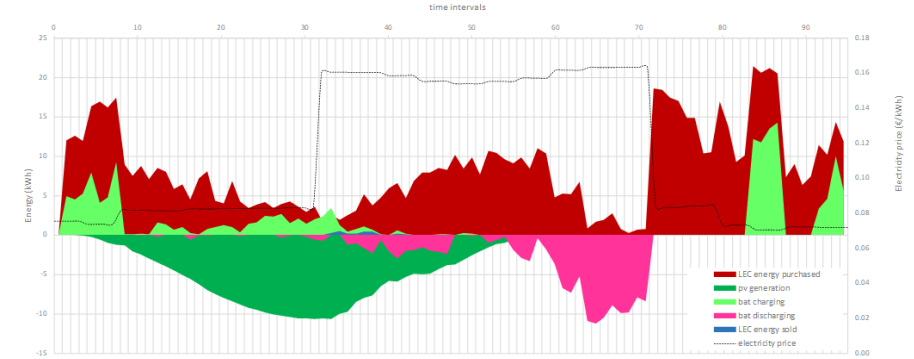


Fig. 6. LEC HEMS results

The highest peak purchase occurs during the time slots where the purchased price of electricity is low. Due to the objective function seeks to minimize the total energy cost of each prosumer, it makes sense that in periods where electricity is more expensive, the amount of energy purchased will be less in order to save money. In fact, the minimum amount of energy purchased is just in the time interval where the cost of energy has its maximum and right after, when prices decreases, the LEC buys energy in order to charge EVs and batteries. This situation will produce a rebound effect in the system, since it goes from a minimum to almost a maximum peak in the distribution system energy demand.

It is also observed that during the periods when there is solar radiation, exactly from 5 to 59 time interval, the power purchase is low, since load consumption is mainly fed by photovoltaic generation.

It is interesting to observe how the HEMS has re-scheduled the EV charging sessions. Figure 7 displays de EV consumption baseline and the EVs consumption after the HEMS performance. The EV discomfort cost for shifting the charging session is different for each prosumer. For example, prosumer 5 has a high EV discomfort cost, so the EV consumption can not be shifted far away. EVs with a low discomfort cost can be shifted more number of periods in order to save money. Most of the EV charging sessions have been moved towards periods where the price of electricity is low. There is a clear tendency to group the volume of the EVs and shift them towards periods that are cheaper than the EV baseline.

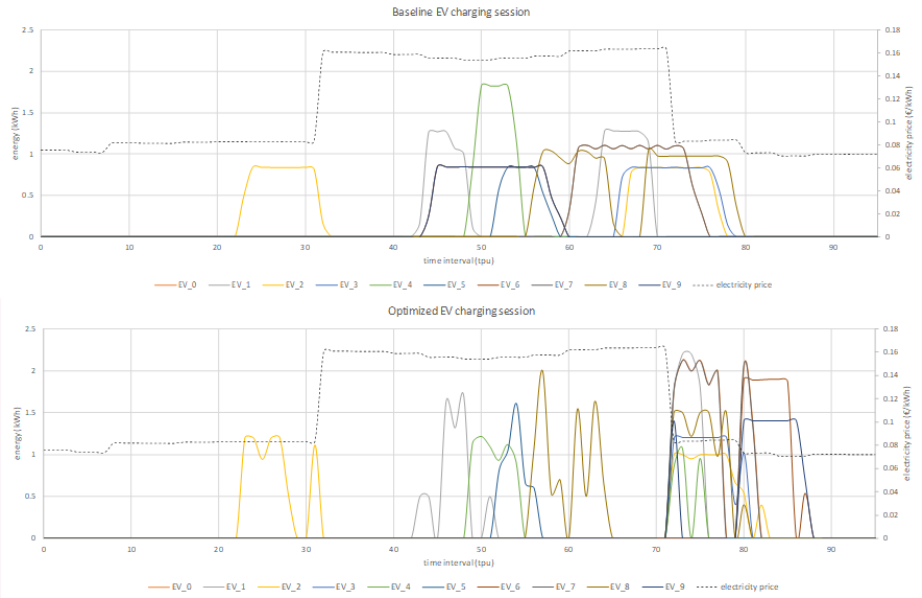


Fig. 7. EV baseline and optimized charging session

5 Conclusions

The integration of the Distributed Energy Resources (DER) into the electrical system directly implies an increase in the self-consumption of the electrical energy in the households that own that renewable resource. As a direct consequence, this trend generates, as it has already been proven in this work, a high variable and intermittent power purchase to the grid.

Furthermore, the prosumer flexibility service, which only seeks the individual benefit, brings even more problems related to the stability and quality of the electrical supply.

From this work, the following conclusions can be drawn:
The sale price of electricity used in the Spanish market context is not high enough to prioritize that sale, instead, charging batteries is a priority in order to discharge them during periods where the electricity price is high. Selling back to the grid will only be worth it when the batteries have already reached their maximum capacity. Also, it can be affirmed that the total electricity cost has been reduced in all individual prosumer optimization. Batteries are a key flexibility asset.

Acknowledgment

This work has been supported by the INVADE H2020 project (2017–2019), which has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation program under Grant Agreement No. 731148.

A Sets, parameters and variables

Sets

B	Set of battery units
G	Set of generation units
G^d	Subset of generation units that are curtailable disconnectable
G^r	Subset of generation units that are curtailable reducible
I	Set of shift intervals
I^{ev}	Subset of electric vehicles interval
I^p	Subset of load shiftable profile intervals
I^v	Subset of load shiftable volume intervals
L	Set of load units
L^i	Subset of load units that are inflexible
L^d	Subset of load units that are curtailable and disconnectable
L^r	Subset of load units that are curtailable and reducible
L^p	Subset of load units that are shiftable profile
L^v	Subset of load units that are shiftable volume
T	Set of periods in the planning horizon
V	Set of EVs charging points

Parameters

A_b^{ch}	Efficiency parameter for charging battery unit $b \in B$
A_b^{dis}	Efficiency parameter for discharging battery unit $b \in B$
$D_l^{max,d}$	Maximum duration of a regulation for load unit $l \in L^d$
$D_l^{min,d}$	Minimum rest time between two regulations for load unit $l \in L^d$
$D_l^{max,r}$	Maximum duration of a regulation for load unit $l \in L^r$
$D_l^{min,r}$	Minimum rest time between two regulations for load unit $l \in L^r$
$E_v^{max,ev}$	Maximum charging power allowed for charging point $v \in V$ [kWh]
$E_l^{max,v}$	Maximum charging power allowed for load unit $l \in L^v$ [kW]
$E_v^{min,ev}$	Minimum charging power allowed for charging point $v \in V$ [kW]
$E_l^{min,v}$	Minimum charging power allowed for load unit $l \in L^v$ [kW]
$K_{t,v,i}^{aux,ev}$	Parameter to penalize shifting charging volume in charging point $v \in V$ in shift interval $i \in I^{ev}$ during period $t \in T$
$K_{t,l,i}^{aux,v}$	Parameter to penalize shifting charging volume of load $l \in L^v$ in shift interval $i \in I^v$ during period $t \in T$
N	Number of time intervals per hour
$N_l^{max,d}$	Maximum number of regulations for load unit $l \in L^d$ in the planing horizon
$N_l^{max,r}$	Maximum number of regulations for load unit $l \in L^r$ in planing horizon
O_b^{min}	Minimum state of charge allowed for battery $b \in B$ [kWh]
O_b^{max}	Maximum state of charge allowed for battery $b \in B$ [kWh]

$P_b^{b,ch}$ Degradation price for charging battery unit $b \in B$ [€/kWh]
$P_g^{gen,d}$ Price for disconnecting generation unit $g \in G^d$ [€/kWh]
$P_g^{gen,r}$ Price for reducing the output power of generation unit $g \in G^r$ [€/kWh]
$P_l^{load,d}$ Price for disconnecting load unit $l \in L^d$ [€/kWh]
$P_l^{load,p}$ Price for shifting consumption for shiftable profile load unit $l \in L^p$ [€/kWh]
$P_l^{load,r}$ Price for reducing consumption for curtailable load unit $l \in L^r$ [€/kWh]
$P_l^{load,v}$ Price for shifting volume consumption for shiftable volume load unit $l \in L^v$ [€]
$P_t^{retail,buy}$ Price for purchasing electricity from the grid in period $t \in T$ [€/kWh]

P^{taxes} Electricity bill VAT tax. Constant parameter
$P^{retail,sell}$ Price for selling electricity back to the grid [€/kWh]

P_v^{ev} Price for shifting volume for charging point $v \in V$ with 1 kWh [€]
Q_b^{ch} Maximum charging power allowed for battery unit $b \in B$ [kW]
Q_b^{dis} Maximum discharging power allowed for battery unit $b \in B$ [kW]
S_b^{ch} Threshold in charging process for battery unit $b \in B$
S_b^{dis} Threshold in discharging process for battery unit $b \in B$
$\sigma_b^{SOC,init}$ Energy stored in battery unit $b \in B$ at the beginning of the planing horizon [kWh]
$\sigma_b^{SOC,end}$ Energy stored in battery unit $b \in B$ at the end of the planning horizon [kWh]
$T_{i,v}^{start,ev}$ First period in EV shift interval $i \in I^{ev}$ in charging point $v \in V$
$T_{i,l}^{start,p}$ First period in load shift interval $i \in I^p$ and load unit $l \in L^p$
$T_{i,l}^{start,v}$ First period in load shift interval $i \in I^v$ and load unit $l \in L^v$
$T_{i,v}^{end,ev}$ Last period in EV shift interval $i \in I^{ev}$ in charging point $v \in V$
$T_{i,l}^{end,p}$ Last period in load shift interval $i \in I^p$ and load $l \in L^p$
$T_{i,l}^{end,v}$ Last period in load shift interval $i \in I^v$ and load l
$V_{i,v}^{start,ev}$ First period in charging point shift interval $i \in I^{ev}$ where the vehicle unit $v \in V$ has a baseline consumption
$V_{i,l}^{start,p}$ First period in load shift interval $i \in I^p$ where the load unit $l \in L^p$ has a baseline consumption
$V_{i,l}^{start,v}$ First period in load shift interval $i \in I^v$ where the load unit $l \in L^v$ has a baseline consumption
$V_{i,v}^{end,ev}$ Last period in charging point shift interval $i \in I^{ev}$ where the charging point $v \in V$ has a baseline consumption
$V_{i,l}^{end,p}$ Last period in load shift interval $i \in I^p$ where the load unit $l \in L^p$ has a baseline consumption
$V_{i,l}^{end,v}$ Last period in load shift interval $i \in I^v$ where the load unit $l \in L^v$ has a baseline consumption
$W_{t,g}^{gen,d}$ Baseline generation of electricity from generation unit $g \in G^d$ in period $t \in T$ [kWh]
$W_{t,g}^{gen,r}$ Baseline generation of electricity from generation unit $g \in G^r$ in period $t \in T$ [kWh]

$W_{t,v}^{ev}$	Baseline charging schedule for charging point $v \in V$ during period $t \in T$ [kWh]
$W_{t,l}^{load,d}$	Baseline consumption of load unit $l \in L^d$ in period $t \in T$ [kWh]
$W_{t,l}^{load,i}$	Baseline consumption of inflexible load unit $l \in L^i$ in period $t \in T$ [kWh]
$W_{t,l}^{load,p}$	Baseline consumption at load unit $l \in L^p$ in period $t \in T$ [kWh]
$W_{t,l}^{load,r}$	Baseline consumption of load unit $l \in L^r$ in period $t \in T$ [kWh]
$W_{t,l}^{load,v}$	Baseline consumption of load unit $l \in L^v$ during period $t \in T$ [kWh]
$X^{max,exp}$	Maximum exported power allowed to the grid [kW]
$X^{max,imp}$	Contracted power. Maximum power allowed by contract to import from the grid [kW]

Variables

δ_t^{buy}	Binary variable that is set to 1 if site is importing/buying electricity from the grid in period $t \in T$
δ_t^{sell}	Binary variable that is set to 1 if site is exporting/selling electricity to the grid in period $t \in T$
$\delta_{t,g}^{gen,d}$	Binary variable equal to 0 if generation unit $g \in G^d$ is disconnected in period $t \in T$; else 0
$\delta_{t,l}^{start,d}$	Binary variable equal to 1 if regulation of load unit $l \in L^d$ ends in the beginning of period $t \in T$; else 0
$\delta_{t,l}^{start,r}$	Binary variable equal to 1 if regulation of load unit $l \in L^r$ in period $t \in T$; else 0
$\delta_{t,l}^{run,d}$	Binary variable equal to 1 if regulation of load unit $l \in L^d$ is running in period $t \in T$; else 0
$\delta_{t,l}^{run,r}$	Binary variable equal to 1 if regulation of load unit $l \in L^r$ is running in period $t \in T$; else 0
$\delta_{t,l}^{end,d}$	Binary variable equal to 1 if regulation of load unit $l \in L^d$ ends in the beginning of period $t \in T$; else 0
$\delta_{t,l}^{end,r}$	Binary variable equal to 1 if regulation of load unit $l \in L^r$ ends in the beginning of period $t \in T$; else 0
$\phi_{t,v}^{ch}$	Amount of electricity charged in charging point $v \in V^v$ in period $t \in T$ [kWh]
$\gamma_{i,l,n}$	Binary variable equal to 1 if consumption for load unit $l \in L^p$ is shifted n periods for load shift interval $i \in I^p$; else 0
$\psi_{t,g}^{gen,d}$	Amount of electricity produced from generation unit $g \in G^d$ in period $t \in T$ [kWh]
$\psi_{t,g}^{gen,r}$	Amount of electricity produced from generation unit $g \in G^r$ in period $t \in T$ [kWh]
$\rho_{i,v}^{ev}$	Help variable to handle positive and negative values of $\tau_{i,v}^{ev}$ in charging point $v \in V^v$ in shift interval $i \in I^{ev}$

$\rho_{i,l}^{load}$	Help variable to handle positive and negative values of $\tau_{i,l}^{load,v}$ in load $l \in L^v$ in shift interval $i \in I^v$
$\sigma_{t,b}^{ch}$	Amount of electricity charged to battery unit $b \in B$ in period $t \in T$ [kWh]
$\sigma_{t,b}^{dis}$	Amount of electricity energy discharged to battery unit $b \in B$ in period $t \in T$[kWh]
$\sigma_{t,b}^{SOC}$	Amount of electricity energy stored to battery unit $b \in B$ in period $t \in T$ [kWh]
$\tau_{i,v}^{ev}$	Weighted average delay for charging point $v \in V^v$ in interval $i \in I^{ev}$
$\tau_{i,l}^{load}$	Weighted average delay for shiftable volume load unit $l \in L^v$ in interval $i \in I^v$
$\omega_{t,l}^{load_p}$	Amount of electricity consumed from load unit $l \in L^p$ in period $t \in T$ [kWh]
$\omega_{t,l}^{load,v}$	Amount of electricity consumed from load unit $l \in L^v$ in period $t \in T$ [kWh]
χ_t^{buy}	Amount of electricity bought in period $t \in T$ [kWh]
χ_t^{sell}	Amount of electricity sold in period $t \in T$ [kWh]
$\chi_{t,l}^{load,d}$	Amount of energy reduced from load $l \in L^d$ in period $t \in T$ [kWh]
$\chi_{t,l}^{load,r}$	Amount of energy reduced from load $l \in L^r$ in period $t \in T$ [kWh]
$\zeta_{t,b}^{bat}$	Cost of charging batteries $b \in B$ in the time horizon $t \in T$ €
$\zeta_{t,v}^{ev}$	Cost of charging EV in charging point $v \in V^v$ in the time horizon $t \in T$ [€]
$\zeta_{t,g}^{gen,d}$	Total cost for disconnecting generation unit $g \in G^d$ in period $t \in T$ [€]
$\zeta_{t,g}^{gen,r}$	Total cost for reducing the power of generation unit $g \in G^r$ in period $t \in T$ [€]
$\zeta_{t,l}^{load,d}$	Cost for disconnecting load unit $l \in L^d$ in period $t \in T$ [€]
$\zeta_{t,l}^{load,r}$	Cost for curtailing reducible load unit $l \in L^r$ in period $t \in T$ [€]
$\zeta_{t,l}^{load,p}$	Cost for shifting load unit $l \in L^p$ in period $t \in T$ [€]
$\zeta_{t,l}^{load,v}$	Cost for shifting volume load unit $l \in L^v$ in period $t \in T$ [€]

References

[1] P. Lloret-Gallego P. Olivella-Rosell et al. *INVADE H2020 project: Overall INVADE architecture D4.1*. https://h2020invade.eu/deliverables/. [Online; accessed 2-Feb-2018]. 2018.

[2] Marc Beaudin and Hamidreza Zareipour. "Home energy management systems: A review of modelling and complexity". In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 45 (2015), pp. 318 –335. ISSN: 1364-0321. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.046. URL: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115000568.

[3] M. Castillo-Cagigal et al. "PV self-consumption optimization with storage and Active DSM for the residential sector". In: *Solar Energy* 85.9 (2011), pp. 2338 –2348. ISSN: 0038-092X. DOI: https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.06.028. URL: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X11002404.

[4] *DataPort Data Base*. https://dataport.cloud/. [Online; accessed 01-May-2018]. 2018.

[5] Onur Elma and Ugur Savas Selamogullari. "A new home energy management algorithm with voltage control in a smart home environment". In: *Energy* 91 (2015), pp. 720 –731. ISSN: 0360-5442. DOI: https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.08.094. URL: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544215011706.

[6] European Union. *Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council on common rules for the internal market in electricity*. 2017. URL: https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/1{_}en{_}act{_}part1{_}v7{_}864.pdf.

[7] Rebecca Ford et al. "Categories and functionality of smart home technology for energy management". In: *Building and Environment* 123 (2017), pp. 543 –554. ISSN: 0360-1323. DOI: https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.07.020. URL: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132317303062.

[8] Mohammad Ali Fotouhi Ghazvini et al. "Demand response implementation in smart households". In: *Energy and Buildings* 143 (2017), pp. 129 –148. ISSN: 0378-7788. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.03.020. URL: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037877881730823X.

[9] Aaron Hansen, Jason Staggs, and Sujeet Shenoi. "Security analysis of an advanced metering infrastructure". In: *International Journal of Critical Infrastructure Protection* 18 (2017), pp. 3 –19. ISSN: 1874-5482. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijcip.2017.03.004. URL: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1874548217300495.

[10] Nadeem Javaid et al. "A new heuristically optimized Home Energy Management controller for smart grid". In: *Sustainable Cities and Society* 34 (2017), pp. 211 –227. ISSN: 2210-6707. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.06.009. URL: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670717303074.

[11] Xin Jin et al. "Foresee: A user-centric home energy management system for energy efficiency and demand response". In: *Applied Energy* 205 (2017), pp. 1583 –1595. ISSN: 0306-2619. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.08.166. URL: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261917311856.

[12] K. Kok and S. Widergren. "A Society of Devices: Integrating Intelligent Distributed Resources with Transactive Energy". In: *IEEE Power and Energy Magazine* 14.3 (2016), pp. 34–45. ISSN: 1540-7977. DOI: 10.1109/MPE.2016.2524962.

[13] H. T. Nguyen, D. T. Nguyen, and L. B. Le. "Energy Management for Households With Solar Assisted Thermal Load Considering Renewable Energy and Price Uncertainty". In: *IEEE Transactions on Smart Grid* 6.1 (2015), pp. 301–314. ISSN: 1949-3053. DOI: 10.1109/TSG.2014.2350831.

[14] Pol Olivella-Rosell et al. "Local Flexibility Market Design for Aggregators Providing Multiple Flexibility Services at Distribution Network Level". In: *Energies* 11.4 (2018).

[15] Pol Olivella-Rosell et al. "Optimization problem for meeting distribution system operator requests in local flexibility markets with distributed energy resources". In: *Applied Energy* 210 (2018), pp. 881 –895. ISSN: 0306-2619. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.08.136. URL: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261917311522.

[16] *OMIE: precio del mercado diario*. http://www.omie.es/reports. [Online; accessed 17-June-2018]. 2018.

[17] M. Pipattanasomporn, M. Kuzlu, and S. Rahman. "An Algorithm for Intelligent Home Energy Management and Demand Response Analysis". In: *IEEE Transactions on Smart Grid* 3.4 (2012), pp. 2166–2173. ISSN: 1949-3053. DOI: 10.1109/TSG.2012.2201182.

[18] A. Vieira Pombo, J. Murta-Pina, and V. Fernão Pires. "Multiobjective formulation of the integration of storage systems within distribution networks for improving reliability". In: *Electric Power Systems Research* 148 (2017), pp. 87 –96. ISSN: 0378-7796. DOI: https://doi.org/10.1016/j.epsr.2017.03.012. URL: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779617301128.

[19] I. Bayram R. Jovanovic A. Bousselham. "Residential Demand Response Scheduling with Consideration of Consumer Preferences". In: *Applied Sciences* 6 (2016). URL: http://www.mdpi.com/2076-3417/6/1/16.

[20] R. Khalid S. Mehboob Hussain A. Zafar. "Complex, Intelligent, and Software Intensive Systems". In: (2017), pp. 163–174.

[21] Tohid Sattarpour, Daryoush Nazarpour, and Sajjad Golshannavaz. "A multi-objective HEM strategy for smart home energy scheduling: A collaborative approach to support microgrid operation". In: *Sustainable Cities and Society* 37 (2018), pp. 26 –33. ISSN: 2210-6707. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.09.037. URL: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670717308533.

[22] Mohammad Shakeri et al. "An intelligent system architecture in home energy management systems (HEMS) for efficient demand response in smart grid". In: *Energy and Buildings* 138 (2017), pp. 154 –164. ISSN: 0378-7788. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.026. URL: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778816318369.

[23] Guilherme de Oliveira e Silva and Patrick Hendrick. "Photovoltaic self-sufficiency of Belgian households using lithium-ion batteries, and its impact on the grid". In: *Applied Energy* 195 (2017), pp. 786 –799. ISSN: 0306-2619. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.03.112. URL: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261917303495.

[24] B. Xu et al. "Factoring the Cycle Aging Cost of Batteries Participating in Electricity Markets". In: *IEEE Transactions on Power Systems* 33.2 (2018), pp. 2248–2259. ISSN: 0885-8950. DOI: 10.1109/TPWRS.2017.2733339.

[25] Rehman Zafar et al. "Prosumer based energy management and sharing in smart grid". In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 82 (2018), pp. 1675 –1684. ISSN: 1364-0321. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.07.018. URL: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117310894.

Hacia una Plataforma de Servicios para Apps Inteligentes en Ciudades Intermedias*

J. Andres Diaz-Pace[1], Luis Berdun[1], Alejandro Zunino[1], and Silvia Schiaffino[1]

ISISTAN Research Institute, CONICET and UNICEN University, Tandil Buenos Aires 7000, Argentina http://www.isistan.unicen.edu.ar {andres.diazpace, luis.berdun, alejandro.zunino, silvia.schiaffino}@isistan.unicen.edu.ar

Resumen Las ciudades inteligentes (o *smart cities*) constituyen una tendencia en alza en muchas ciudades de Argentina. En particular, las denominadas ciudades intermedias presentan un contexto y requerimientos diferentes a los de las grandes ciudades respecto a ciudades inteligentes. Un aspecto de relevancia es el fomentar el desarrollo de aplicaciones (generalmente para dispositivos móviles) que posibiliten a los ciudadanos aprovechar datos y servicios asociadas normalmente a la ciudad, por ejemplo, en el dominio de movilidad urbana. En este trabajo, se propone una plataforma para ciudades intermedias que provea servicios de "alto nivel" y que permita la construcción de aplicaciones de software que consuman dichos servicios. La estrategia centrada en la plataforma apunta a integrar sistemas y fuentes de datos heterogéneos, y proveer servicios "inteligentes" a distintas aplicaciones. Ejemplos de estos servicios incluyen: construcción de perfiles de usuario, recomendación de eventos locales, y sensado colaborativo en base a técnicas de data mining, entre otros. En este trabajo, se describe el diseño de esta plataforma (actualmente en progreso), y se discuten experiencias de aplicaciones para movilidad urbana, que están siendo migradas bajo la forma de servicios reusables provistos por la plataforma.

Keywords: Ciudades intermedias · Middleware · Servicios inteligentes · Aplicaciones de movilidad urbana.

1. Introducción

Una ciudad puede verse como un ecosistema complejo de personas y organizaciones que conviven y trabajan juntos para alcanzar sus objetivos. En los últimos años, los centros urbanos han tenido un gran impacto en el desarrollo económico y social de los países, y este fenómeno ha involucrado no sólo a las grandes ciudades sino también a las denominadas *ciudades intermedias* (de aproximadamente 500 mil habitantes) [5]. En el caso de Argentina, esta situación ha sido analizada en varios reportes [8], con una discusión de temáticas como: movilidad

* Financiado por CONICET-Argentina mediante proyecto PU-E 2017 "Plataforma de Servicios para el Desarrollo de Software de Ciudades Inteligentes", y en colaboración con la Municipalidad de Tandil (Buenos Aires, Argentina)

urbana, eficiencia energética, tratamiento de residuos, salud, medioambiente, y comunicación entre gobierno y ciudadanos, que se han trasladado naturalmente al ámbito de ciudades inteligentes.

Las ciudades inteligentes (o *smart cities*) constituyen una tendencia en alza en Argentina, que pretende integrar soluciones de las TIC con el fin de mejorar la calidad de vida de sus ciudadanos y su interacción con los responsables del gobierno. El proceso de transformación de una ciudad en una *smart city* normalmente se asocia a grandes centros urbanos, que suelen ser considerados como más proclives para la innovación. Sin embargo, también las ciudades intermedias han cobrado una importancia creciente en lo referido a innovación. Las ciudades intermedias poseen capacidades de generar y consolidar redes que posibiliten la interacción y el flujo de conocimiento entre los diversos actores, tales como las universidades y centros de investigación, las empresas y los gobiernos locales y el sector asociativo [8]. Un ejemplo de dichas ciudades es el caso de Tandil. Un rasgo distintivo de las ciudades intermedias en relación al desarrollo de *smart cities* es su contexto, que normalmente difiere del de una gran ciudad (por ej., Buenos Aires o Córdoba, en Argentina) [16]. Una ciudad intermedia es un centro más fácilmente gobernable, y que permite en principio mayor participación ciudadana en el gobierno y la gestión de la ciudad.

En el caso de ciudades inteligentes, la capacidad de trabajar con datos heterogéneos y de múltiples fuentes es clave [10]. A esto debe sumarse la capacidad de aplicar técnicas de minería de datos y de predicción sobre estas fuentes de datos. Desde un punto de vista ingenieril, si bien se han propuesto soluciones específicas para distintos sistemas (por ej., transporte, gestión de residuos, energía o salud), éstas suelen ser ad-hoc y/o focalizadas en conjuntos de datos específicos, con pocas facilidades de reutilización o de interoperabilidad. La integración de sistemas en una *smart city* es un requerimiento normal en la evolución de dicha ciudad, y requiere contar con una infraestructura (o *middleware*) subyacente que provea una serie de servicios básicos (por ej., soporte al desarrollo de aplicaciones, despliegue, gestión y mantenimiento de aplicaciones). Una estrategia de Ingeniería de Software para esta problemática es la de contar con una arquitectura de referencia [13,3] para *smart cities*, que luego pueda derivar en la construcción de una plataforma para desarrollo de aplicaciones.

Los desafíos antes mencionados llevan a la necesidad de investigar las plataformas de software de servicios para una ciudad intermedia inteligente como un estrato diferenciado, que no responde a las dinámicas de las grandes ciudades ni a las soluciones de software tradicionales (o comerciales) para ellas. Si bien es factible planificar un ambiente de IoT para una ciudad intermedia, generalmente la infraestructura para IoT requiere de un esfuerzo económico importante a fin poder aprovechar sus beneficios, y no siempre es viable en ciudades del interior de Argentina. Una alternativa a explorar son los dispositivos móviles que, por su ubicuidad en la población y su capacidad para conectarse a Internet, hacen que las apps móviles constituyan un enfoque interesante para configurar una ciudad inteligente. En el marco de una ciudad intermedia es importante lograr una integración de distintas fuentes de información de entrada, y sacar provecho

de dicha información para ofrecer servicios útiles a los ciudadanos. En este sentido, se habla de servicios inteligentes cuando se emplean técnicas de minería de datos, procesamiento de lenguaje natural, y análisis de redes sociales, entre otras técnicas, con el fin de producir alertas, notificaciones, respuestas a preguntas, y recomendaciones, entre otras salidas, que consideren el contexto de un usuario (o grupo de usuarios) o de una aplicación particular.

En este trabajo, se propone el desarrollo de una plataforma de servicios inteligentes para la ciudad de Tandil, considerada como una ciudad intermedia típica de Argentina. La plataforma apunta a proveer, progresivamente, servicios de alto nivel que permitan (y faciliten) el desarrollo de aplicaciones de software (para la ciudad) en base a dichos servicios. Ejemplos de estos servicios incluyen: construcción de perfiles de usuario, recomendación de eventos locales, y sensado colaborativo, en base a técnicas de data mining y procesamiento paralelo distribuido. Se argumenta que esta estrategia centrada en plataforma promoverá un proceso paulatino de transformación de Tandil en una ciudad más conectada e inteligente. Como dominio inicial para la plataforma, se está trabajando sobre aplicaciones vinculadas a transporte y movilidad urbana.

El resto del artículo se encuentra estructurado en 5 partes. En la Sección 2 se provee un marco conceptual sobre *smart cities*, con un énfasis en la categoría de ciudades intermedias. En la Sección 3 se discute la propuesta de plataforma y su arquitectura. En la Sección 4 se presentan algunas experiencias con aplicaciones de transporte que, mediante un proceso de refactorización, están actualmente siendo incorporadas como servicios a la plataforma. La Sección 5 está abocada a trabajos relacionados. Finalmente, la Sección 6 presenta las conclusiones y plantea líneas de trabajo futuro.

2. Marco Conceptual

Se han propuesto varias definiciones de *smart city* en la literatura [9,17,1,4], algunas orientadas hacia los servicios que se proveen a los ciudadanos, otras hacia la gestión eficiente de recursos urbanos, y otras concentradas en sociedad y economía. En este trabajo, una ciudad inteligente es un ambiente urbano caracterizado por el uso de tecnología para: i) facilitar la coordinación o integración de sub-sistemas urbanos; y ii) mejorar la experiencia y calidad de vida de las personas en del ambiente urbano. El primer aspecto conlleva un monitoreo continuo de (sub-)sistemas por parte del ente de gobierno de la ciudad, y la disponibilización de los datos recolectados hacia los ciudadanos. El segundo aspecto implica un aprovechamiento "inteligente" de la información y la provisión de servicios con valor agregado, que permitan una interacción fluida entre el gobierno y los ciudadanos. La característica de inteligencia no es menor en este marco, ya que el mero hecho de poner a disposición conjuntos de datos en forma electrónica no implica necesariamente un uso efectivo de dichos datos por los ciudadanos. Una característica relacionada es la de usabilidad de los servicios e información provista, por ejemplo, mediante tecnologías Web y de dispositivos móviles.

Las tecnologías más comúnmente empleadas en *smart cities* [19] incluyen: Internet of Things (IoT), Big Data, *cloud computing*, y los denominados sistemas

ciber-físicos, sumado a la computación ubicua y orientación a servicios [14]. En particular, en el caso de las ciudades inteligentes, la capacidad de trabajar con datos heterogéneos y provenientes de múltiples fuentes es clave. Uno de los dominios donde es posible aprovechar distintas tecnologías y fuentes de información es la movilidad y el transporte urbano.

2.1. Ciudades intermedias

Las denominadas "ciudades intermedias" constituyen un fenómeno creciente en Latinoamérica, y en particular, en Argentina [16]. Por su propia naturaleza y dinámica, diferente a la de las grandes urbes, las ciudades intermedias tienen la posibilidad de llevar a cabo proyectos de desarrollo territorial sostenibles y de mejorar su función de servicios e infraestructura. La dinámica de una ciudad intermedia suele implicar el establecimiento de relaciones con otros núcleos urbanos y con el campo. Adicionalmente, una ciudad intermedia, por su propia escala, tiene la posibilidad de llevar a cabo proyectos de desarrollo territorial sostenibles y de fomentar emprendimientos (por ej., turismo). Existen varias ciudades intermedias en Argentina con agendas relacionadas con *smart cities*. Una de estas ciudades es Tandil, y se toma como referencia para el presente trabajo. Los entornos urbanos de las ciudades intermedias plantean, para los responsables de la gestión municipal, demandas de: eficiencia, desarrollo sostenible, calidad de vida y gestión de los recursos. En este escenario, la aplicación de las TIC aparece como una respuesta concreta a la urbanización no planificada y a la necesidad de orientar esta expansión a mejorar la calidad de vida de las personas [12].

Tandil [1] es una ciudad intermedia de la provincia de Buenos Aires, que ha crecido de forma continua y heterogénea durante los últimos años. La población actual ronda los 150.000 habitantes, y la ciudad se extiende de forma irregular en un valle con una superficie aproximada de 50 km^2. El crecimiento urbano de la ultima década ha sido disperso y espontáneo, por distintas razones, y no siempre ha respondido a un plan u organización que haya considerado la disposición de las infraestructuras de transporte y servicios. La principal actividad productiva de Tandil es la agricultura intensiva (trigo, soja, maíz, girasol) y la ganadería, aunque también se desarrollan otras actividades como el turismo y la actividad metalúrgica. La presencia de la Universidad Nacional del Centro (UNICEN) y de diversos centros de investigación ha permitido más recientemente el desarrollo de actividades científico-tecnológicas, y fomentado la radicación de varias empresas dedicadas a las TIC. Esto ha impulsado con fuerza el sector de software y servicios informáticos que hoy emplea alrededor de 1200 personas [12].

El gobierno municipal de Tandil ha incorporado la utilización de TIC en diversas ramas, desde nuevos servicios a los ciudadanos (por ej., acceso a trámites vía Internet, mayor conectividad, Internet gratuito en espacios públicos) a mecanismos de acceso a la información pública. Desde 2015, se desarrolla el denominado Sistema Único de Movilidad Ordenada (SUMO) que utiliza una tarjeta única para el estacionamiento medido, el boleto electrónico para buses, y próximamente un sistema de bicicletas públicas. También se ha implementado el uso de las redes sociales como medio de comunicación con el ciudadano.

[1] `http://www.tandil.gov.ar`

No obstante, el ecosistema de Tandil y la introducción de las TIC plantea ciertos desafíos para la ciudad. Un primer desafío es lograr un modelo participativo y colaborativo de los ciudadanos en relación a la gestión municipal, por ejemplo, a través de canales de redes sociales o de otros mecanismos de participación ciudadana. El ciudadano ya no es un ente pasivo que internaliza servicios en su vida, sino un consumidor activo e informado, que se integra a un proceso de interacción bi-direccional de la información entre el cliente y el proveedor de los servicios. Un segundo desafío es el de fomentar nuevas oportunidades de negocio para las empresas de la región, y particularmente para las empresas basadas en conocimiento como son las empresas de software. Un tercer desafío tiene que ver con lograr una mejor articulación del territorio, ya que la presencia territorial del Estado no es todavía homogénea (por ej., en ciertos barrios).

Por otro lado, se debe considerar que si bien la inversión en tecnología en la ciudad ha sido importante en los últimos años (por ej., en lo referido a semaforización y cámaras de vigilancia), no se prevé una incorporación masiva de sensores (IoT) en la ciudad, en parte por el costo económico asociado y porque los ciudadanos no perciben (todavía) beneficios en el corto plazo de dichos sensores para su quehacer diario. En este contexto, es más factible aprovechar los dispositivos móviles de los ciudadanos para una estrategia de ciudad inteligente.

2.2. Movilidad urbana

La movilidad urbana se refiere a la gestión los medios de transporte dentro de la ciudad y a los costos, en tiempo y dinero, que implican para los ciudadanos trasladarse de un lugar a otro para realizar sus actividades diarias. Una *smart city* tiene que estar comprometida con un uso eficiente y multi-modal del transporte, fomentando el transporte público y aquellas opciones con menor impacto sobre la polución del ambiente. En las ciudades intermedias, el transporte tanto público (por ej., buses) como privado (por ej., automóviles) es utilizado por gran parte de los ciudadanos, incluso muchos de ellos dependen de su correcto funcionamiento. Este tipo de cuestiones, casi rutinarias, de las personas que se ven afectadas por la experiencia que perciben de los servicios de transporte son factores determinantes a la hora de plantear alternativas para mejorarlo. Dentro de las características para mejorar los servicios se distingue, por ejemplo, el pago electrónico mediante el uso de tarjetas, lo que permite contar con información específica de los viajes de cada usuario.

Movilidad urbana es una de las aplicaciones típicas de una *smart city*, por ejemplo, mediante apps para transporte público o provisión de rutinas personalizadas para un usuario. Para el diseño de estas aplicaciones (generalmente con soporte de dispositivos móviles) se debe proveer de información de valor a los usuarios a fin de lograr elecciones inteligentes para el viaje [7]. Al mismo tiempo, las empresas de transporte deben comprometerse a mejorar la calidad de los servicios prestados, la cuál también es influenciada por la cantidad y calidad de información que es suministrada por parte de los usuarios.

Actualmente, Tandil cuenta con el sistema SUMO para algunos aspectos de movilidad urbana. Este sistema es operado mediante tarjetas, y es accesible a

través de la Web y de dispositivos móviles, como se muestra en la Figura 1. Este tipo de sistemas presenta ventajas como: i) la no utilización de dinero en efectivo al subir a un bus, ii) la consulta de saldo por parte de los usuarios, y iii) la visualización de los recorridos de las líneas de buses de la ciudad (en tiempo real), entre otros. Esto brinda un mejor servicio al ciudadano en el sentido de que puede manejar mejor sus tiempos a la hora de tomar un bus. El sistema SUMO también permite gestionar, mediante las mismas tarjetas y unidades de registro (parquímetros) por cuadra, el estacionamiento de vehículos en un sector (centro) de la ciudad. El software del sistema SUMO es provisto por una empresa privada. Sin embargo, estas aplicaciones y fuentes de datos no está actualmente diseñadas para integrarse con otras fuentes de información u otros sistemas. Este fue uno de los disparadores para nuestro trabajo sobre una plataforma integradora.

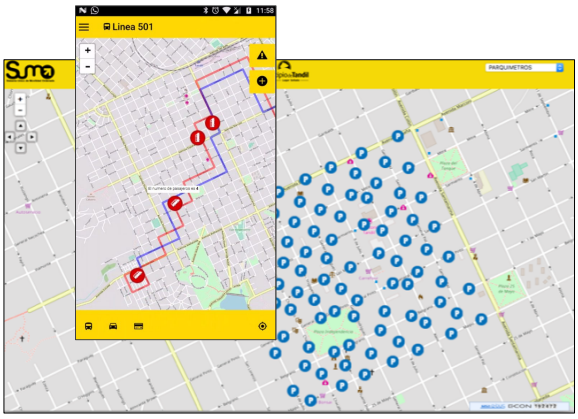


Figura 1. Ejemplo de sistema SUMO para movilidad urbana en Tandil.

Toda ciudad que se considere inteligente debería promover (dentro de sus necesidades y capacidades específicas) un transporte público eficiente, aprovechando la información que los mismos ciudadanos puedan brindar (ya sea, voluntariamente, o a través de sensores tecnológicos) para asegurar la velocidad y disponibilidad (con tiempos coherentes) de los medios de transporte. A su vez, el ciudadano debe poder estar informado para decidir mejor sobre sus opciones de movilidad, y también poder informar sobre problemas en el servicio.

3. Enfoque centrado en Plataforma

Dadas las características particulares de las ciudades intermedias con planes de volverse *smart cities* en Argentina, en este trabajo se propone un enfoque de automatización centrado en tres bloques básicos: i) la construcción de una plataforma de servicios a nivel municipal, ii) la provisión de un conjunto de servicios montados sobre dicha plataforma, y iii) el desarrollo de un conjunto de apps que consuman los servicios de la plataforma. En este enfoque, el desarrollo de la plataforma toma preponderancia (por sobre las apps), ya que constituye el corazón del sistema en lo referido a integración de datos de fuentes heterogéneas, y provisión de capacidades inteligentes para disponibilizar datos hacia las apps.

Además de los ciudadanos (o usuarios finales), la plataforma posee dos destinatarios principales: los organismos públicos, y los desarrolladores de aplicaciones. Por un lado, los organismos públicos (por ej., la misma municipalidad de Tandil) buscan mejorar la calidad de vida y servicios públicos a ofrecer a los ciudadanos mediante soluciones de *smart cities*, y para ello se enfrentan a cuestiones de: costos, tiempo, dependencia de soluciones propietarias, y aspectos de privacidad, entre otros. Por otro lado, los desarrolladores de aplicaciones para *smart cities* se enfrentan a problemas de: falta de estándares, difícil acceso a datos públicos, y largos procesos de integración de sistemas. En este sentido, la plataforma busca facilitar y potenciar la construcción de aplicaciones, con foco en dispositivos móviles, para desarrolladores y empresas de la región.

La provisión de servicios inteligentes es un diferenciador del enfoque, ya que permite valerse de técnicas de Inteligencia Artificial y Machine Learning para proveer información con valor agregado, en función de la combinación de distintas fuentes de datos. Por ejemplo, ante problemáticas diarias de una ciudad como: los conductores que desean saber donde hay un lugar de estacionamiento disponible, o los ciudadanos que desean saber cuando llegará el siguiente bus, pueden emplearse algoritmos de predicción o de recomendación. Esto implica no considerar cada aplicación o proveedor de información como un "silo". Por ejemplo, el sistema SUMO actual funciona correctamente pero se centra solamente sobre el estacionamiento medido y la gestión del transporte público de buses. Un desarrollador de una app móvil podría tomar esta información, y en vez de simplemente mostrársela al usuario, podría combinarla con información municipal para determinar lugares donde está prohibido estacionar, y reusar un servicio de ruteo y geolocalización, e intentar inferir lugares libres para una ventana de tiempo dada. Con estos datos, la predicción podría incluir un ranking (o recomendación) de los lugares con mayor probabilidad de estar desocupados.

En lo que respecta a la construcción de la plataforma y la progresiva evolución de sus capacidades (en el tiempo), se considera beneficiosa la definición de una *arquitectura de referencia* [3], que partiendo de modelos existentes en la literatura, provea las capas principales de abstracción y grupos funcionales para una *smart city*. La Figura 2 presenta una organización inicial de la arquitectura de referencia para la plataforma, derivada de [19], adaptada al contexto de una ciudad intermedia (como Tandil), y a las características de procesamiento y análisis inteligente de datos buscadas por nuestro enfoque. Una arquitectura de referencia (de software) define los principales bloques funcionales, la asignación de dichas funcionalidades a componentes, y sus patrones de interacción, para un determinado dominio o conjunto de sistemas. Cabe destacar que cuando se construye (o materializa) un sistema determinado a partir de una arquitectura de referencia, no necesariamente deben utilizarse todos los bloques sino que puede ensamblarse el sistema a partir de un sub-conjunto de ellos.

Los principales elementos de la plataforma propuesta son:

- **Middleware.** Representa el nivel base de recepción y envío de mensajes y eventos de la plataforma, ya sea para entidades externas a la plataforma como para entidades internas. Se asume un mecanismo de comunicación des-

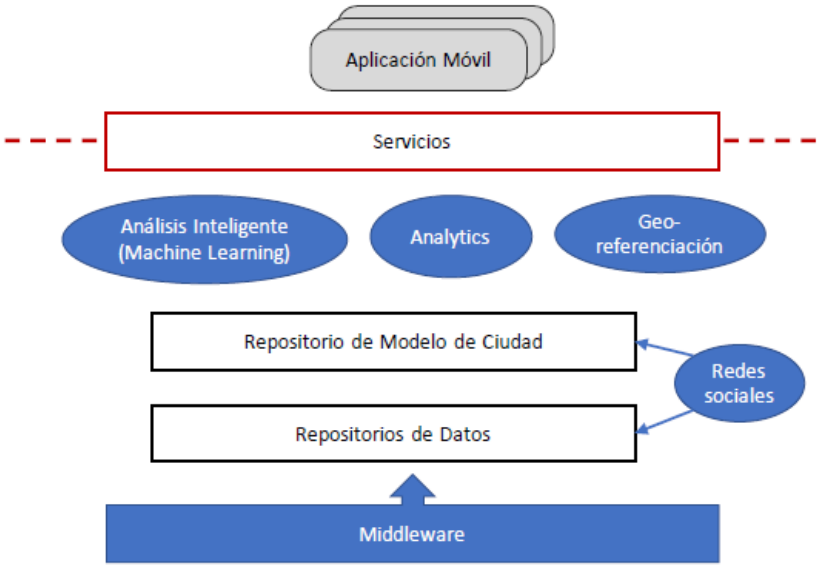


Figura 2. Esquema de arquitectura de referencia para ciudad intermedia *smart-city*.

acoplado, bajo un esquema publicador/subscriptor, que brinde flexibilidad a la hora de integrar nuevos sistemas y también portabilidad.

- **Repositorios de Datos.** Este nivel captura las diferentes fuentes de información que provee la plataforma, que pueden ser: archivos, bases de datos relacionales, bases de datos NoSQL, y streams de datos, entre otras.
- **Repositorios con Modelo de Ciudad.** Constituye un modelo de información opcional, que facilita la manipulación, integración, y entendimiento de los datos de la plataforma (nivel anterior) por parte de los otros elementos.
- **Análisis Inteligente.** Se refiere a la utilización de técnicas de Inteligencia Artificial para procesar información (generalmente, en formatos no estructurados), con el propósito de identificar patrones y realizar predicciones. Estas capacidades de análisis están orientadas a aplicaciones de *smart cities* más que a aplicaciones generales de Inteligencia Artificial.
- **Analytics.** Provee capacidades para análisis descriptivos (por ej., visualizaciones), y predictivos de la información de los repositorios. Generalmente, funciona en tándem con el análisis inteligente, pero puede ser opcional.
- **Geo-referenciación.** Normalmente, las aplicaciones requieren un soporte de mapas y geo-localización, que permitan situar al usuario o a eventos, o bien integrar información disponible en cierta región de la ciudad.
- **Redes Sociales.** Se consideran una fuente particular de información bi-direccional (entre los ciudadanos y la plataforma, y vice-versa), que a menudo puede alimentar las funcionalidades de análisis inteligente y de analytics.
- **Servicios.** Los elementos previos son internos de la plataforma. La interacción con aplicaciones y el aprovechamiento de la funcionalidad anterior se realiza mediante una capa de servicios. Estos servicios generalmente están expuestos como servicios Web (por ej., con tecnología REST).

Para la materialización de esta arquitectura de referencia en una plataforma de software se plantea una estrategia "conducida por ejemplos", a partir de la definición de una arquitectura base y de una serie de aplicaciones existentes. Inicialmente, no es necesario que dichas aplicaciones estén construidas sobre la plataforma, ya que la idea es re-factorizarlas en función de servicios que podría proveer la plataforma, y en ese ejercicio progresivamente construir y mejorar los servicios de la plataforma. En otras palabras, en una primera fase, la estrategia de desarrollo consiste en que la infraestructura de servicios emerja a partir de las necesidades concretas de aplicaciones existentes. En una segunda fase, se espera que las aplicaciones se construyan directamente sobre la plataforma, aprovechando servicios existentes en ella.

4. Experiencias: Asistencia para Movilidad Urbana

En esta sección, se presentan una serie de aplicaciones para movilidad urbana en Tandil que, a partir de una aplicación tradicional cliente-servidor, han ido evolucionado y mejorando sus servicios, y a la vez contribuyendo a un primer prototipo de la plataforma proyectada.

AsisTAn. Esta aplicación móvil fue inicialmente construida para brindar asistencia personalizada a un conductor en sus rutinas cotidianas [6,11]. Dicha asistencia se focaliza en eventos de tránsito que pueden afectar dichas rutinas. La aplicación aprende las rutinas del conductor, y sumándole información de eventos de tránsito, le provee rutas alternativas para llegar a su destino sin inconvenientes, en caso de que su rutina se vea afectada por dichos eventos. El dispositivo móvil permite capturar la información del usuario que es utilizada para poder aprender, de forma no intrusiva, su rutina. El asistente provee una visualización de las rutinas aprendidas y los recorridos de las mismas en un mapa. Los experimentos y simulaciones realizadas sobre la herramienta generaron resultados prometedores, en términos de precisión en el reconocimiento de actividades rutinarias, proveyendo recomendaciones satisfactorias para diferentes perfiles de usuario. La Figura 3 ilustra cómo el diseño inicial (a) que fue desarrollado en forma ad-hoc, es decir, sin utilizar servicios de plataforma, puede evolucionarse hacia un nuevo diseño (b) que aprovecha los servicios de la plataforma.

La nueva versión de *AsisTAn* sigue utilizando un servidor donde se encuentran almacenados los perfiles de usuario, pero re-implementa su funcionalidad de recomendación de rutas en base a tres servicios de la plataforma (marcados por círculos en la figura). Estos servicios (refactorizados) tienen que ver con: la obtención de caminos (no personalizados) entre un origen y un destino dados, la extracción de información publicada por ciudadanos en Twitter sobre problemas de tránsito, y el algoritmo base de recomendación. Estos servicios se corresponden con las capacidades de: geo-referenciación, repositorios de datos y redes sociales, y análisis inteligente, respectivamente. Se decidió no migrar los perfiles de usuario a la plataforma por cuestiones de confidencialidad.

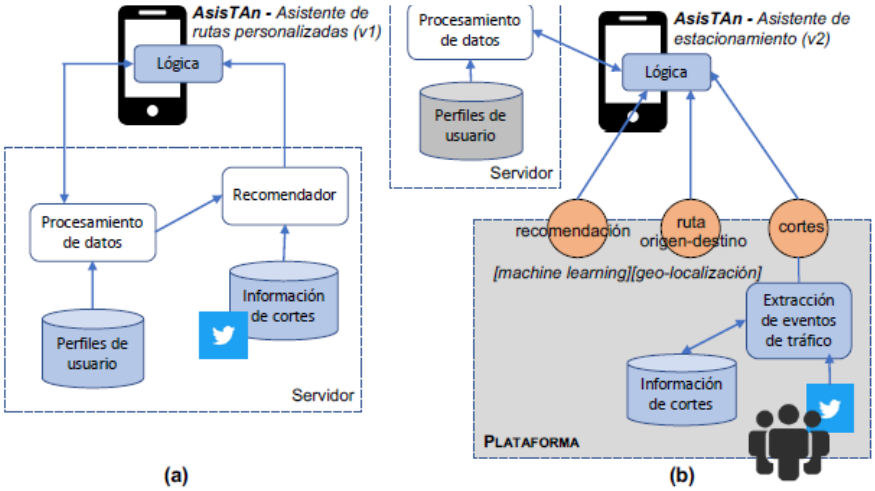


Figura 3. Transformación de una aplicación ad-hoc (o standalone) (a) en una aplicación que provea los servicios de la plataforma

La Figura 4 muestra el estado actual del desarrollo de la plataforma, donde se están integrando dos nuevas aplicaciones: *Manwe* y *EsTAcionAR*, para reporte de eventos de tráfico y de estacionamiento de vehículos, respectivamente.

Manwe. Esta aplicación es una mejora a la funcionalidad de extracción de información de tránsito a partir de Twitter que existía en *AsisTAn*. *Manwe* [6] encapsula a nivel plataforma un servicio de clasificación, análisis y geolocalización de tweets. Se combinan técnicas de Machine Learning y de Procesamiento de Lenguaje Natural para procesar los tweets y detectar incidentes de tránsito. *Manwe* se encarga de registrar en una base de datos los incidentes reportados en Twitter. Los incidentes detectados son geolocalizados en un mapa de la ciudad. A cada incidente se le asigna una duración, para indicarle al usuario su vigencia. Notar que la información de cortes también se puede alimentar de información de los sitios institucionales de la municipalidad de Tandil.

EsTAcioNAR. Esta aplicación móvil busca asistir a los conductores a encontrar un espacio libre de estacionamiento dentro del perímetro de estacionamiento medido (de SUMO). Si bien el sistema actual de estacionamiento permite obtener información básica sobre el número total de automóviles estacionados por cuadra, esta información no está accesible al ciudadano mediante una app. Tampoco se brinda asistencia para indicar al conductor si puede encontrar un espacio libre en una determinada cuadra. La información hoy capturada por SUMO es parcial en este sentido, ya que no considera factores como: las cocheras por cuadra, las zonas prohibidas para estacionamiento vehicular, ni el vehículo particular que desea estacionar y su ruta hasta el centro de la ciudad. La estrategia adoptada para construir la aplicación consiste en aprovechar fuentes heterogéneas información para proveer una predicción razonable de un lugar libre. Para ello, se combinan varios servicios. En primer lugar, se parte de la información sobre registro de estacionamientos provista por SUMO (parquímetros). A esto se le

suman servicios para identificar avisos del municipio de Tandil, y para determinar los posibles lugares libres por cuadra (en base a un análisis geográfico de cada cuadra en particular). El algoritmo de predicción está basado en series de tiempo y Machine Learning [24]. Los servicios de la Figura 4 se corresponden a las capacidades de: geo-referenciación, repositorios de datos, análisis inteligente, y redes sociales, de la plataforma.

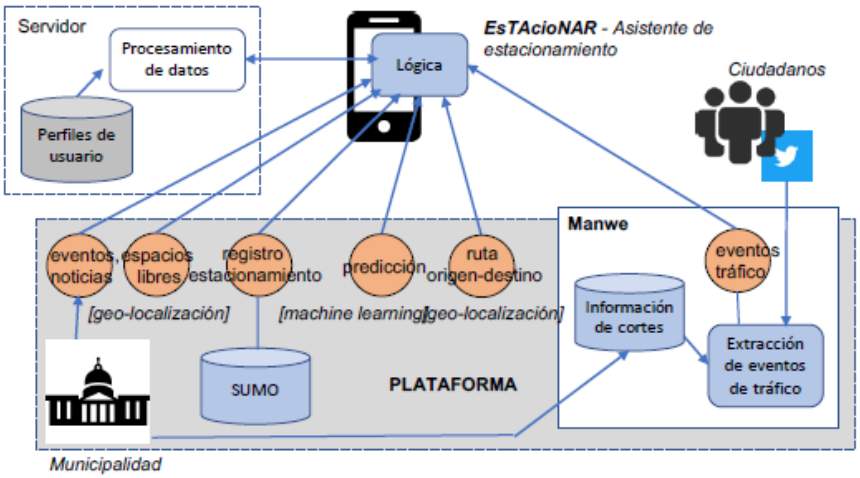


Figura 4. Evolución de la plataforma, incorporando nuevas aplicaciones y servicios

Un punto relevante de *EsTAcioNAR* es que reutiliza los desarrollos previos de *Manwe* y de otros servicios ya disponibles en la plataforma. Adicionalmente, se desea notar que el "valor agregado" de la aplicación respecto a sus capacidades de predicción implica una combinación de servicios más que un desarrollo ad-hoc para el problema de estacionamiento. En consecuencia, el esfuerzo de desarrollo de la app es relativamente bajo, en comparación con un enfoque de tipo "silo".

Se desea notar que varios de los datos urbanos a almacenar en los repositorios de la plataforma están generalmente administrados por las autoridades municipales. En el caso de Tandil, estos datos están regidos por la implementación de una ordenanza municipal orientada a datos abiertos. En este sentido, se ha establecido un proyecto de cooperación y trabajo conjunto, a fin de poder incorporar dichos datos en la plataforma.

5. Trabajos Relacionados

Un relevamiento de tecnologías, plataformas, y algunas aplicaciones para *smart cities* se presenta en [20,19], y en base a este análisis, los autores proponen una arquitectura inicial de referencia que sirve de base para el presente trabajo. A partir del análisis de las plataformas existentes, se observa que las principales actividades de una plataforma están orientadas a controlar el ciclo de vida de los datos de la ciudad en lo que se refiere a: i) recolectar datos con una red de sensores wifi, ii) administrar los datos en la plataforma, iii) procesar los datos utilizando un modelo de ciudad, y iv) compartir los datos procesados

permitiendo el acceso externo. Por otro lado, se destacan aspectos no funcionales de la plataforma tales como: reutilización de componentes ya desarrollados, flexibilidad para evolucionar en el tiempo, escalabilidad (ante incrementos en la demanda), performance en tiempo real (en caso de ser necesario), y usabilidad por parte de usuarios y aplicaciones, entre otros aspectos de calidad.

Una instancia típica de plataforma de *smart city* es SmartSantander [18], una infraestructura experimental centrada en la ciudad de Santander (España) y con instalaciones en otras ciudades de Europa. Santander puede considerarse como una ciudad intermedia en el contexto europeo. SmartSantander procesa una gran variedad de información, condiciones del tráfico, temperatura, emisiones de CO2, humedad y luminosidad, mediante un conglomerado de sensores. El diseño de SmartSantander puede no ser fácilmente trasladable a otras ciudades, debido a su modelo de ciudad y la estrecha relación con la plataforma de IoT. Una plataforma que trabaja de forma similar a SmartSantander es PadovaSmartCity [23], que utiliza IoT para crear una red de sensores en la ciudad de Padua (Italia). En relación a esto último, la plataforma europea para ciudades inteligentes (EPIC) [2] propone un middleware para el uso y administración de la red de sensores wireless (WSN), contemplando cuestiones de heterogeneidad, interoperabilidad, escalabilidad, extensibilidad y configurabilidad en WSN. Por otro lado, Civitas [21] es un middleware orientado a objetos para manejar distintos dispositivos y sensores, y que adicionalmente incorpora una capa para procesar la información recolectada mediante técnicas de Big Data. SmartSantander, PadovaSmartCity y Civitas pueden considerarse como desarrollos basados en la tecnología de IoT, con un énfasis fuerte en la incorporación de hardware embebido y sensores en el espacio urbano. Esta característica, si bien novedosa, las diferencia del contexto y expectativas de las ciudades intermedias en Argentina. Por otro lado, las plataformas no incluyen aspectos de procesamiento inteligente de la información y personalización, las cuáles son responsabilidad de las aplicaciones que pueden desarrollarse sobre estas plataformas.

Recientemente, en [15] se discute la provisión de plataformas genéricas para *smart cities*, en contraposición a soluciones ad-hoc para ciudades específicas. Los autores discuten tres factores que contribuyen a desarrollar soluciones particulares. Un primer factor tiene que ver con la necesidad de cada ciudad de satisfacer requerimientos no funcionales diferentes (por ej., seguridad, escalabilidad, disponibilidad), y la evolución de las aplicaciones en el tiempo, en lo que refiere a necesidades de integración con distintas fuentes de datos o cumplimiento de normativas. El segundo factor se refiere a la falta de herramientas para evaluar el impacto de las tecnologías de una *smart city* en los ciudadanos, o para comparar distintas aplicaciones o plataformas. El tercer factor se vincula al bajo desarrollo de las soluciones *open-source* respecto a soluciones comerciales y a problemas de interoperabilidad entre proveedores de soluciones. En este contexto, los autores hacen una propuesta *open-source* de plataforma basada en micro-servicios llamada IntersCity, en base a la arquitectura de referencia de [20]. IntersCity, en principio, puede ser adaptada a diferentes dominios, tales como transporte público, seguridad y ambiente, y puede ser consumida por aplicaciones Web y

móviles. Otra plataforma genérica *open-source* que ha logrado algunos casos de éxito es Sentilo[2]. De forma similar a otras soluciones, el objetivo está en proveer mecanismos para almacenamiento de datos y su posterior análisis, por ejemplo, mediante sistemas de reglas para generación de alarmas. Este tipo de plataformas comparten varias de las ideas desarrolladas en nuestro enfoque, aunque se centran primordialmente en ambientes IoT, y solo abordan mínimamente el procesamiento inteligente de los datos.

Existen en el mercado algunas soluciones comerciales con plataformas para *smart cities*, como las provistas por IBM[3] o Living PlanIT[4], que están orientadas a grandes urbes más que a ciudades intermedias. Si bien estas soluciones pueden funcionar en ciudades de distinto tamaño, sus componentes están abocados al control de dispositivos, y no tanto al procesamiento inteligente de datos.

Respecto a movilidad urbana, algunas empresas están comenzando a ofrecer soluciones para diferentes problemas, generalmente de ciudades grandes. Por ejemplo, Smart Parking[5] diseña, desarrolla y administra tecnologías de estacionamiento inteligente. En particular, posee servicios para encontrar lugares libres, ya sea dentro de la ciudad como fuera de ella. Los servicios se basan en el uso de sensores, cámaras y análisis inteligente de datos. Por otro lado, aplicaciones como GoogleMaps utilizan datos de geolocalización provistos por dispositivos móviles para analizar la velocidad del tráfico en cualquier instante de tiempo. Tras adquirir Waze en 2013, GoogleMaps puede además incorporar incidentes de tráfico reportados por los usuarios, tales como: accidentes, zonas en construcción o reparación. Utilizando esta información GoogleMaps puede sugerir, por ejemplo, la ruta más rápida hacia o desde el trabajo.

6. Conclusiones y Perspectiva

Las *smart cities* han dado origen a avances en soluciones para obtener datos mediante sensado de diferentes aspectos de las ciudades. Si bien existen soluciones ad-hoc y comerciales en este sentido, existen necesidades particulares de las ciudades intermedias que motivan nuevas formas de explotar la información disponible, en base a un aprovechamiento, por ejemplo, de capacidades de sensado participativo en dispositivos móviles de los ciudadanos. En este trabajo se presentaron las principales consideraciones de diseño de una plataforma para *smart cities*, acotada a necesidades de ciudades intermedias, y particularmente al caso de Tandil. Además, se describió una experiencia de aplicaciones de movilidad urbana que involucra tanto la plataforma como algunos algoritmos de análisis de datos, y los desafíos que este escenario plantea.

Existen trabajos que sugieren que los usuarios de transporte poseen necesidades de información con "valor agregado", tales como funciones personalizadas de avisos tempranos e información multi-modal sobre el viaje [22]. Actualmente, si bien existen ciertas soluciones comerciales y *open-source*, dichas soluciones no

[2] `http://www.sentilo.io`
[3] `https://www.ibm.com/smarterplanet/us/en/smarter_cities/overview`
[4] `http://www.living-planit.com`
[5] `https://www.smartparking.com`

consideran los hábitos de cada usuario, sino que actúan de la misma forma para todos los usuarios. Por otro lado, estas soluciones no están diseñadas necesariamente para ciudades intermedias, donde el foco está puesto en un desarrollo y gestión urbana eficiente. En este sentido el trabajo propuesto permite proveer a los desarrolladores de apps de servicios reusables con fines de personalización y asistencia en la movilidad urbana. Poder conocer el estado actual de un parquímetro, o inferir la ocupación de un bus en pleno recorrido, permiten agregar una capacidad innovadora al desarrollo de una app para movilidad urbana. Actualmente, se está trabajando en el desarrollo de servicios para la plataforma que brinden información de congestionamiento en las principales calles a partir del análisis de vídeo de las cámaras de seguridad instaladas en la ciudad.

Respecto a la implementación de los módulos de servicios en la plataforma, que se espera poder ofrecer a los desarrolladores de apps, se ha observado que la separación entre dichos servicios y las fuentes de datos sobre las cuáles debieran operar no siempre es clara. En algunas ocasiones, resulta más práctico que la plataforma ofrezca los datos directamente a los desarrolladores de apps (consumidores), y que ellos construyan sus propios servicios. Eventualmente, algunos de estos servicios podrían luego volcarse a la plataforma. En consecuencia, se está evaluando contemplar un modelo colaborativo de desarrollo.

Como próximos pasos, se cuenta con un relevamiento inicial y orientativo sobre objetivos del gobierno municipal de Tandil en lo referido a una *smart city*, y también sobre preocupaciones de los ciudadanos. Adicionalmente a la movilidad urbana, estos aspectos tienen que ver con: estado de las calles, animales callejeros (denuncia, control, búsqueda de hogares), control de espacios verdes (baldíos, si hay basura, corte de pastizales), acceso a espacios recreativos (mantenimiento, limpieza, objetos rotos: farolas, bancos, juegos), recolección de residuos (no pasan los recolectores, basura arrojada en espacios públicos), y turismo (circuitos para visitantes, ubicación en la ciudad, opciones de servicios al turista). Para la plataforma en si, se planea brindar un mejor soporte para aplicaciones móviles, y a corto plazo seleccionar un *middleware open-source* y basado en micro-servicios.

Referencias

1. Anthopoulos, L.G.: Understanding the Smart City Domain: A Literature Review, pp. 9–21. Springer International Publishing (2015)
2. Ballon, P., Glidden, J., Kranas, P., Menychtas, A., Ruston, S., Graaf, S.: Is there a need for a cloud platform for european smart cities? In: eChallenges e-2011 Conference Proceedings (2011)
3. Bass, L., Clements, P., Kazman, R.: Software Architecture in Practice. Addison-Wesley Professional, 3rd edn. (2012)
4. Belissent, J.: Getting clever about smart cities: New opportunities require new business models. https://www.forrester.com/go?objectid=RES56701 (2013)
5. Bolay, J.C., Rabinovich, A.: Intermediate cities in latin america risk and opportunities of coherent urban development. Cities **21**(5), 407 – 421 (2004)
6. Caimmi, B., Vallejos, S., Berdun, L., Soria, A., Amandi, A., Campo, M.: Deteccion de incidentes de transito en twitter. In: IEEE Biennial Congress of Argentina (ARGENCON). pp. 1–6 (2016)

7. Cairns, S., Sloman, L., Newson, C., Anable, J., Kirkbride, A., Goodwin, P.: Smarter choices: changing the way we travel. Tech. Rep., Department for Transport (2005)
8. Capellan, N., Jolias, L., Prince, A.: Ciudades inteligentes. el aporte de las TIC a la comunidad. Cámara de Informática y Comunicaciones de la Rep. Argentina (2016)
9. Chourabi, H., Nam, T., Walker, S., Gil-Garcia, J.R., Mellouli, S., Nahon, K., Pardo, T.A., Scholl, H.J.: Understanding smart cities: An integrative framework. In: Proceedings of the 45th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS). pp. 2289–2297. IEEE Computer Society, Washington, DC, USA (2012)
10. Corbellini, A., Godoy, D., Mateos, C., Schiaffino, S., Zunino, A.: DPM: A novel distributed large-scale social graph processing framework for link prediction algorithms. Future Generation Computing Systems **78**, 474–480 (2018)
11. D'Cristofaro, S., Giannoni, A.: Asistencia inteligente en la planificacion personalizada de la movilidad urbana. In: 45 Jornadas Argentinas de Informatica e Investigacion Operativa (JAIIO), XIX EST (2016)
12. Finquelievich, S., Feldman, P., Girolimo, U.: Ciudades medias, innovacion y desarrollo local: El caso de Tandil. Ciudades Inteligentes. Libro digital (2016)
13. Guessi, M., Oquendo, F., Nakagawa, E.: An approach for capturing and documenting architectural decisions of reference architectures. In: 26th International Conference on Software Engineering and Knowledge Engineering. pp. 162–167 (2014)
14. Khatoun, R., Zeadally, S.: Smart cities: Concepts, architectures, research opportunities. Communications of the ACM **59**(8), 46–57 (2016)
15. de M. Del Esposte, A., Kon, F., Costa, F., N., L.: Interscity: A scalable microservice-based open source platform for smart cities. In: 6th International Conference on SmartCities and Green ICT Systems (2017)
16. Manzano, F., Velazquez, G.: La evolución de las ciudades intermedias en la argentina. Geo UERJ **27**, 258 – 282 (2015)
17. Neirotti, P., Marco, A.D., Cagliano, A.C., Mangano, G., Scorrano, F.: Current trends in smart city initiatives: Some stylised facts. Cities **38**, 25 – 36 (2014)
18. Sanchez, L., noz, L.M., Galache, J., Sotres, P., Santana, J., Gutierrez, V., Ramdhany, R., Gluhak, A., Krco, S., Theodoridis, E., Pfisterer, D.: Smartsantander: IoT experimentation over a smart city testbed. Computer Networks **61**, 217–238 (2014)
19. Santana, E.F.Z., Chaves, A.P., Gerosa, M.A., Kon, F., Milojicic, D.S.: Software platforms for smart cities: Concepts, requirements, challenges, and a unified reference architecture. ACM Computing Surveys **50**(6), 78:1–78:37 (2017)
20. da Silva, W., Alvaro, A., Tomas, G., Afonso, R.A., Dias, K.L., Garcia, V.C.: Smart cities software architectures: A survey. In: Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on Applied Computing (SAC). pp. 1722–1727 (2013)
21. Villanueva, F., Santofimia, M., Villa, D., Barba, J., Lopez, J.C.: Civitas: The smart city middleware, from sensors to big data. In: 7th International Conference on Innovative Mobile and Internet Services in Ubiquitous Computing. pp. 445–450 (2013)
22. Wang, F.: Scanning the issue and beyond: Real-time social transportation with online social signals. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems **15**(3), 909–914 (2014)
23. Zanella, A., Bui, N., Castellani, A., Vangelista, L., Zorzi, M.: Internet of things for smart cities. IEEE Internet of Things Journal **1**(1) (2014)
24. Zheng, Y., Rajasegarar, S., Leckie, C.: Parking availability prediction for sensor-enabled car parks in smart cities. In: 2015 IEEE Tenth International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing (ISSNIP). pp. 1–6. IEEE (2015)

ANÁLISIS DE LA CONTRIBUCIÓN FOTOVOLTAICA EN UN EDIFICIO DE CERO EMISIONES

Ángel L. Zorita Lamadrid[1], Óscar Duque Pérez[1], Daniel Moríñigo Sotelo[1], Sergio L. González González[2], Francisco J. Valbuena García[3], Roque A. Osornio Ríos[4] y Luis Morales Velázquez[4]

[1] Dpto Ingeniería Eléctrica, Universidad de Valladolid, España
[2] Dpto de Ingeniería Energética y Fluidomecánica, Universidad de Valladolid, España
[3] Unidad Técnica de Arquitectura, Universidad de Valladolid, España
[4] HSPdigital-CA Mecatrónica. Universidad Autónoma de Querétaro. México

Resumen

En este trabajo se describe, en primer término, el edificio LUCIA (Lanzadera Universitaria de Centros de Investigación Aplicada), construido por la Universidad de Valladolid como centro de investigación aplicada y base para la investigación en edificación sostenible sobre la base de un funcionamiento íntegro con energías renovables, incluyendo además de las demandas de climatización y ventilación todos los servicios eléctricos e iluminación, todo ello con la pretensión de ser un edificio de energía casi nula (NZEB- Nearly Zero Energy Building), y edificio CERO CO_2. Y en segundo término, con el objetivo de analizar su comportamiento actual, se mostrarán los resultados que se han obtenido en cuanto a la generación fotovoltaica (PV), comparando con las previsiones que se manejaron en su diseño, así como datos de consumo actuales del edificio.

Palabras clave: Fotovoltaica, sostenibilidad, cero emisiones, eficiencia energética

1.- Introducción

La Universidad de Valladolid (UVa) inaugura en el año 2015 un edificio que se diseñó como base donde investigar sobre los aspectos sociales de la edificación sostenible, prototipo para verificar hipótesis sobre las cuales se asientan los métodos y evaluación medioambiental de edificios e investigar sobre aspectos que arrojen luz sobre temas hasta ahora sin paramétrica, utilizando únicamente energías renovables.

Este edificio pretendía surtirse íntegramente con energías renovables, incluyendo en ello además de las demandas de climatización y ventilación todos los servicios eléctricos e iluminación. Es un edificio de energía casi nula (NZEB- Nearly Zero Energy Building), y edificio CERO CO_2.

Transcurridos varios años desde su inauguración, parece no sólo interesante si no necesario, conocer si las pretensiones que se tuvieron en el diseño y construcción del edificio se han alcanzado o por el contrario hay algunos aspectos que no lo han permitido y analizar las causas.

En este trabajo se muestra el análisis de una parte de las medidas que se incluyeron en el edificio para alcanzar el objetivo de energía casi nula, la aportación de generación de energía eléctrica fotovoltaica (PV) mediante una serie de sistemas de estas características que se instalaron en el edificio y que posteriormente se describirán.

2.-El edificio Lucía

El edificio objeto de estudio se denomina LUCIA, acrónimo de Lanzadera Universitaria de Centros de Investigación Aplicada, y nace como una necesidad de dotar a la Universidad de Valladolid de un edificio de investigación aplicada que pudiera albergar diferentes centros científicos, laboratorios de investigación aplicada a través de spin-off o empresas de base tecnológica y flexible en su distribución permitiendo varios usos simultáneos para cubrir una demanda de usos cambiante.

Este edificio ha obtenido certificaciones que le avalan como la edificación más sostenible de Europa y de todo el Hemisferio Norte y la segunda de todo el mundo. Se trata del segundo edificio en el mundo con mejor puntuación (calificación) en la certificación LEED (el primero del hemisferio norte) y cuenta con el

certificado LEED Platinum con 98 puntos. LEED es un sistema de certificación voluntario de edificios sostenibles a nivel mundial, desarrollado por el Consejo de la Construcción Verde de Estados Unidos y se trata del certificado de sostenibilidad en edificios que cuenta con mayor reconocimiento a nivel global.

También cuenta con la máxima calificación, 5 hojas, en la certificación VERDE, certificado de sostenibilidad voluntario a nivel nacional que evalúa la disminución de los impactos medioambientales asociados al edificio objeto con las de otro hipotético edificio que se limitara a cumplir la normativa específica.

Además, ha sido premiado y reconocido en diferentes certámenes y congresos por las soluciones de carácter sostenible aplicadas en el edificio.

3.- Instalaciones

El edificio cuenta con una superficie de 7.500 m^2 construidos (ver figura 1). Se desarrolla en cuatro plantas, tres de ellas sobre rasante y un sótano con aparcamiento totalmente abierto, ventilado e iluminado de forma natural. Las plantas baja, primera y segunda se estructuran en tres bandas longitudinales, las dos laterales (fachadas noreste y suroeste) agrupan los espacios de trabajo, mientras que la banda central alberga todas las dependencias comunes de servicios (aseos, almacenes, montacargas, etc.). En esta última se ubican además dos grandes núcleos abiertos de comunicación que conectan verticalmente todas las plantas mediante escaleras y ascensores accesibles, manifestándose en cubierta como grandes lucernarios con un vidrio fotovoltaico que realiza una triple función: iluminación natural, sombreamiento y producción de electricidad al tratarse de un vidrio fotovoltaico. En la planta de cubierta se dispone en su banda central de espacio para alojar los equipos técnicos necesarios de instalaciones y en sus bandas laterales superficie ajardinada. La funcionalidad y versatilidad del edificio queda garantizada por la repetición del módulo base de trabajo (formado por un laboratorio más dos despachos anejos) y la disposición de dos patinillos longitudinales que recorren el edificio.



Fig. 1.- Vista general del edificio LUCIA

Se pretendió que el edificio fuera ante todo funcional, realizado sobre la base de un diseño bioclimático, considerando para la ejecución todos los aspectos hasta el momento conocidos que garantizan los criterios y las tácticas de una edificación sostenible.

Con el objetivo de minimizar el consumo energético y de agua, y el impacto ambiental a nivel local y global, se han incorporado al edificio una serie de sistemas y medidas que permiten que el edificio se surta íntegramente con energías renovables para abastecer las demandas de climatización, ventilación, todos los servicios eléctricos e iluminación.

Medidas pasivas

a) **Diseño compacto**: la compacidad del edificio es difícilmente mejorable. El excepcional valor de la relación entre la superficie envolvente y volumen contenido permite reducir al mínimo las superficies de intercambio entre el ambiente interior y el exterior.

b) **Orientación de las ventanas y control del soleamiento con parasoles:** la singular y organizada forma de dientes de sierra de las fachadas longitudinales persigue la optimización de la luz natural en los espacios de trabajo (ver figura 2). A la vez, el propio efecto de autosombreado que proporciona esta disposición en zigzag junto con los voladizos empleados en los huecos evita la entrada directa de la radiación solar a las zonas ocupadas del interior del edificio. El cerramiento de la fachada noroeste es prácticamente ciego para minimizar las pérdidas térmicas, mientras que la fachada sur se abre completamente en busca del sol.



Fig. 2.- Vista detalle de la fachada lateral del edificio LUCIA

c) **Envolvente térmica de calidad:** se han empleado grandes niveles de aislamiento térmico en fachadas y cerramientos horizontales con transmitancias térmicas de 0,15 – 0,20 W/m^2 K, empleando aislamientos naturales de fibras de madera en fachadas. También se ha sido cuidadoso con la eliminación de los puentes térmicos y el empleo de carpinterías de alto aislamiento con vidrios de baja emisividad que permiten un mayor control térmico.

d) **Sistema de ventilación eficiente:** la existencia de los dos núcleos de comunicación del edificio coronados por encima del nivel de cubierta con lucernarios a modo de chimeneas solares, permiten a través de una adecuada gestión de la apertura de unos huecos situados en los mismos, llevar a cabo una renovación y enfriamiento del aire aprovechando el tiro natural a través de estas “chimeneas”.

e) La extensión del solar permite contar como parte del sistema de ventilación con un sistema de **energía geotérmica**, que ayuda a garantizar una calidad del aire óptima en el interior del edificio con unos importantes ahorros a través de un sistema de pozos canadienses (ver figura 3), siendo este sistema un gran intercambiador terreno–aire formado por 52 tubos geotérmicos de 18 m de longitud que preacondiciona el aire exterior antes de incorporarlo al edificio.



Fig. 3.- Vista de la instalación de los pozos canadienses

f) La configuración del aparcamiento como un espacio abierto permite ventilar de forma natural y no contar con sistemas de ventilación mecánica que deben de extraer los gases de escape de los vehículos, sistemas cuya utilización conllevaría un consumo energético asociado (ver figura 4).



Fig. 4.- Vista de la zona de aparcamiento del edificio LUCIA

g) **Iluminación natural a través de lucernarios, huecos y pozos de luz:** la gran cantidad de superficie acristalada en fachadas con una adecuada orientación y el empleo del sistema de pozos de luz, de captación de luz solar en cubierta y transmisión a los espacios a través de tubos con superficies reflectantes, supone una reducción de la demanda energética de iluminación de más del 50%. En los núcleos de comunicación la disposición de dos grandes lucernarios permiten contar con luz natural durante las horas del día, estos lucernarios están formados por vidrios fotovoltaicos que cuentan con filtros solares que impiden el paso de gran parte de la radiación infrarroja y ultravioleta (del calor) a la vez que producen electricidad (ver figura 5).



Fig 5.- a) Vista de uno de los lucernarios. b) Vista de los pozos de luz

h) **Vegetación en cubiertas y aparcamiento:** con la disposición de nuevas zonas ajardinadas se ha intentado mantener la superficie verde previa existente a la construcción del edificio y se ha eliminado el efecto isla de calor tan acusado por el empleo de superficies pavimentadas. Las cubiertas del edificio son cubiertas verdes con vegetación autóctona de escaso mantenimiento. En el aparcamiento se ha optado por un suelo con pavimento permeable que permite la existencia de vegetación y el flujo natural del agua de lluvia, posibilitando emplear este suelo como un filtro bajo el cual se recoge en unos aljibes parte de esta agua para utilizarlo en el mismo edificio.

i) **Empleo de sistemas foto catalíticos:** la utilización de cerámica foto catalítica en los revestimientos de la zona de cubierta (petos, etc.) y de pintura también foto catalítica en la fachada permite una depuración del aire atmosférico que entra en contacto con estas superficies. Aunque el impacto no es significativo, el empleo de este revestimiento anticontaminante y bactericida, posibilita gracias al proceso de fotocatálisis, cuando existe luz y humedad, que las moléculas contaminantes (NO_x, SO_x, CO) se transformen en sustancias inofensivas (sales minerales) para la salud humana.

Medidas Activas

a) Energía solar fotovoltaica: Parte de la demanda eléctrica es cubierta por los dos sistemas fotovoltaicos de generación de electricidad instalados. Uno de ellos está formado por los módulos captadores que configuran la hoja exterior del muro cortina doble existente en la zona central de la fachada sureste (ver figura 6) y que tiene una potencia nominal de 10 kW (en adelante fachada sur). El otro sistema está compuesto por vidrios fotovoltaicos incorporados en dos lucernarios sobre cada uno de los cuerpos de escaleras de los dos núcleos de comunicación del edificio, de modo que llevan a cabo una doble función, aportan iluminación natural y producen energía eléctrica, y un muro cortina sobre la cubierta, siendo la potencia nominal en su conjunto de unos 5 kW.



Fig. 6.- Vista de la instalación fotovoltaica fachada sur

b) **Sistema de trigeneración:** Se dispone de una instalación de cogeneración con biomasa de una potencia nominal de 100 kWe y unos 180 kWt. Se trata de un gasificador que transforma biomasa, astilla forestal, en un gas pobre o syngas que alimenta a unos motores de combustión interna. El aprovechamiento térmico del sistema cuando existe demanda de refrigeración se completa con la instalación de una enfriadora por absorción que permite abastecer de frío a la instalación de climatización. Como sistema de seguridad se cuenta con una caldera de biomasa que emplea la misma astilla que el gasificador y una enfriadora por compresión mecánica de alta eficiencia.

c) **Instalación de climatización y ventilación:** se trata de un sistema mixto aire–agua con fancoils a cuatro tubos como unidades terminales que permiten aportar calefacción y refrigeración de forma simultánea en diferentes partes de la instalación, aportando el aire de ventilación a los locales a través de estos fancoils previo tratamiento en la climatizadora de aire primario, equipada con recuperador de calor adiabático de alta eficiencia. Esta climatizadora está equipada con dos entradas de aire, una de aire exterior proveniente de la geotermia y la otra desde el exterior directamente, seleccionando en cada momento el aire que es más conveniente tomar en función de su entalpía.

d) Tanto los motores de las bombas de los circuitos hidráulicos como los de los ventiladores de la climatizadora cuentan con variadores de frecuencia que permiten alcanzar una máxima eficiencia ajustándose a las necesidades de cada momento, impulsando únicamente el caudal de agua demandado.

e) **Gestión inteligente del edificio** a través de un sistema de supervisión, control y monitorización de las instalaciones que permite la programación de la operación de los diferentes elementos y sistemas de climatización e iluminación para el funcionamiento más eficiente.

f) Para el control de la iluminación se cuenta con sensores de intensidad luminosa que regulan y ajustan la intensidad de las lámparas en los espacios de trabajo en caso de necesitar su encendido. En las zonas comunes se cuenta además con detectores de presencia para limitar su encendido a los momentos necesarios y cuando los niveles de iluminación natural no sean suficientes.

g) En climatización, existen termostatos en cada uno de los espacios que permiten regular y controlar de forma independiente el aporte de calor o frío a cada uno de ellos.

h) El edificio se encuentra totalmente monitorizado en cuanto a parámetros térmicos y eléctricos; contando con 97 analizadores de redes eléctricas que permiten conocer el consumo de cada uno de los espacios de trabajo e instalaciones existentes, además de la energía producida; 7 contadores de energía térmica en diferentes puntos de la instalación de climatización; sondas de temperatura en despachos, laboratorios y espacios comunes; e incluso una estación

meteorológica en la cubierta del edificio para conocer diferentes parámetros ambientales y meteorológicos.

i) **Gestión del agua:** El sistema de redes separativas en el edificio permite recoger y reutilizar tanto el agua de la lluvia como las aguas grises de aseos para su uso en los inodoros del edificio. La vegetación autóctona que requiere de un mínimo riego junto con el empleo de aparatos sanitarios de bajo consumo que incorporan grifos con reducción de caudal y fluxómetros permiten reducir el consumo de agua. Además, con el objetivo de reducir aún más el impacto por la actividad del propio edificio, se lleva a cabo un pretratamiento de las aguas residuales de laboratorios antes de su envío a la estación depuradora correspondiente a través de la red de saneamiento urbana.

4.- Estimación de ahorros energéticos

Los resultados obtenidos en las simulaciones energéticas realizadas, extraordinarios especialmente en edificio del sector terciario, han sido certificados con sistemas externos, optando a la calificación LEED-Platino y a la máxima calificación VERDE (GBCEspaña), y han sido las siguientes:

- **Efecto autosombreado:** Según las simulaciones realizadas, supone una reducción de la demanda de refrigeración de un 54%
- **Pozos de iluminación:** Amplían la iluminación natural en el interior y suponen una reducción en torno al 50% de demanda en iluminación
- **Efecto microclima:** La cubierta verde, la vegetación y el aparcamiento abierto con pavimento filtrante reducen el efecto de isla de calor y contribuyen a crear un microclima favorable.
- **Fuerte aislamiento:** Se le puede atribuir una reducción de la demanda en calefacción del 70%.
- **Control de la iluminación / Sistema DALI:** Supone un ahorro de 6,33kW/m^2año y reducción de emisiones de 4,11 kgCO_2/m^2
- **Otras: Ascensores eficientes, control de la climatización, recuperador de calor.**
- **Fotovoltaica**. La fachada sur de doble piel se estimó que tuviese una producción anual de 5.000 kWh y los lucernarios 5.500 kWh, lo que supondría un ahorro anual de 3.570 euros.

Las estrategias bioclimáticas junto con la eficiencia de equipos y sistemas permiten una fuerte reducción de la demanda energética. Las previsiones establecen reducciones energéticas, desde la media de 218 kWh/m^2año de demanda de oficinas en esta zona climática, a una demanda de 65,90 kWh/m^2año que incluye calefacción, refrigeración, ventilación, equipos eléctricos e iluminación en este edificio de laboratorios biomédicos, y finalmente toda la demanda queda satisfecha con 100% energías renovables, con lo que el edificio es de casi CERO ENERGÍA (NZEB) y edificio CERO CO2.

5.- Medidas realizadas

5.1.- Generación fotovoltaica

Con objeto de verificar en parte el comportamiento actual del edificio, se han registrado datos de generación PV desde el año 2016 tanto de los lucernarios como de la fachada sur. Los datos se han obtenido a través de los analizadores instalados en el edificio, mostrando a continuación los resultados obtenidos.

Fachada sur

Como se ha indicado anteriormente, el edificio LUCIA dispone de módulos captadores que configuran la hoja exterior del muro cortina doble existente en la zona central de la fachada sureste y que tiene una potencia nominal de 10 kW (ver figura 7).

La superficie de integración PV de esta instalación es de 98,33 m^2, y se trata de paneles tedlar transparentes con células policristalinas de 6´´ y dimensiones 1730 x 1015 x 35 mm. La superficie libre de células es el 50% aproximadamente y la potencia nominal 180 Wp/m^2.

Se trata de un acristalado en piel interna y techo con doble acristalamiento de 6+16+ (4+4) mm. Transmisión solar 78%, FS: 64%, coeficiente de transmisión térmica: 1,1 W/m^{2}K y reflectancia luminosa exterior del 12%.



Fig. 7.- Vista frontal fachada sur

Lucernarios

En el edificio existen también dos lucernarios, sur y norte, y un muro de cortina cubierta (ver figuras 8 y 9).

El lucernario norte tiene una potencia instalada de 2,52 kW, superficie de integración PV 63,87 m^2 y orientación 145º sur con inclinación 0º. La tecnología empleada es de silicio amorfo con vidrios de dimensiones 2120 x 1245 mm, 10% de transparencia y potencia unitaria 42 Wp/m^2.

El lucernario sur tiene una potencia instalada de 1,68 kW, superficie de integración PV: 42,58 m^2, y orientación 35º sur con inclinación 0º. La tecnología empleada también es de silicio amorfo con vidrios de dimensiones 2120 x 1245 mm, 10% de transparencia y potencia unitaria 42 Wp/m^2.



Fig. 8.- a) Vista del lucernario norte. b) Vista del lucernario sur.

Y el muro cortina de cubierta (ver figura 9) tiene una potencia instalada de 0,84 kW, superficie de integración PV 21,29 m^2 y orientación 35º sur. Como en los casos anteriores, la tecnología utilizada es de silicio amorfo, con vidrios de dimensiones 2120 x 1245 mm, 10% de transparencia y potencia unitaria 42 Wp/m^2.



Fig. 9.- Vista muro cortina cubierta

Resultados obtenidos

A continuación, en las figuras 10, 11 y 12, se muestran los datos registrados de generación PV tanto de la fachada sur como de los lucernarios en su conjunto en los años 2016, 2017 y parte del 2018.

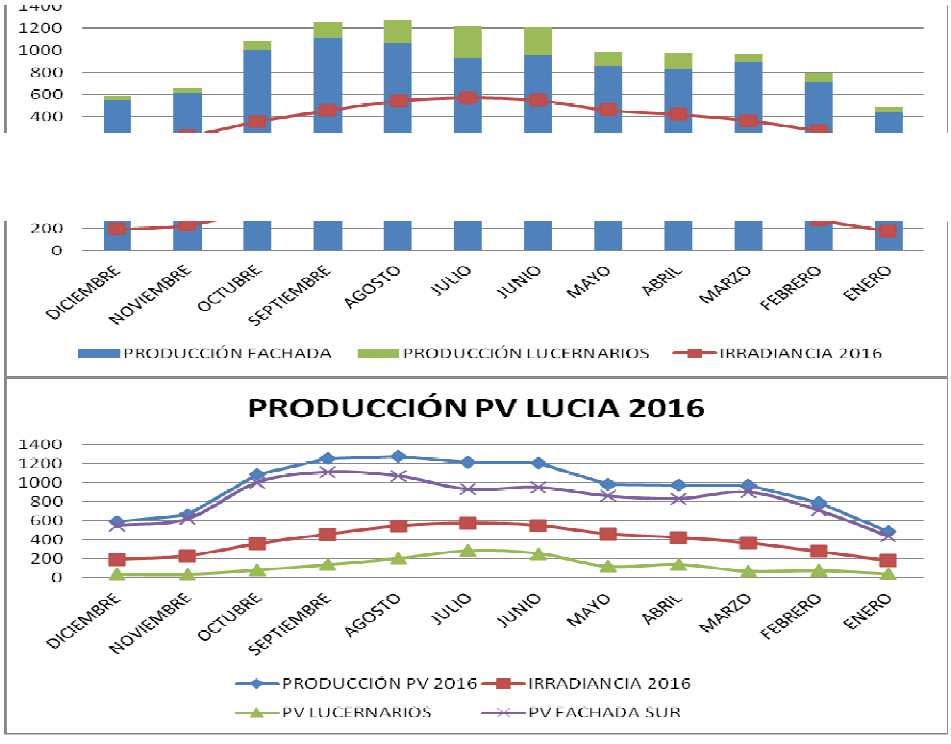


Fig. 10.- Producción fotovoltaica año 2016 en el edificio LUCIA

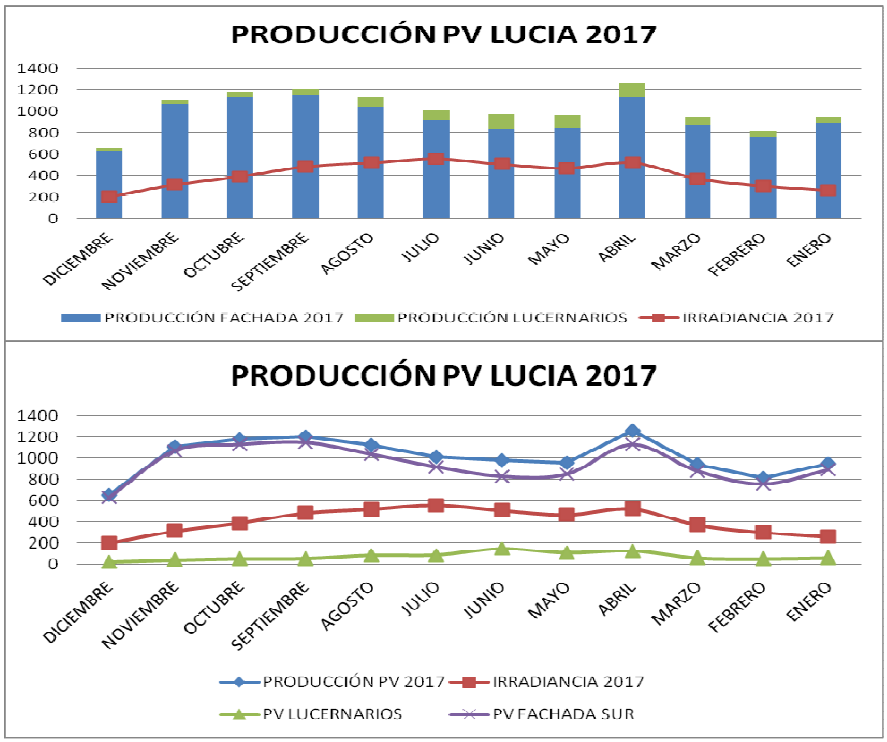


Fig. 11.- Producción fotovoltaica año 2017 en el edificio LUCIA

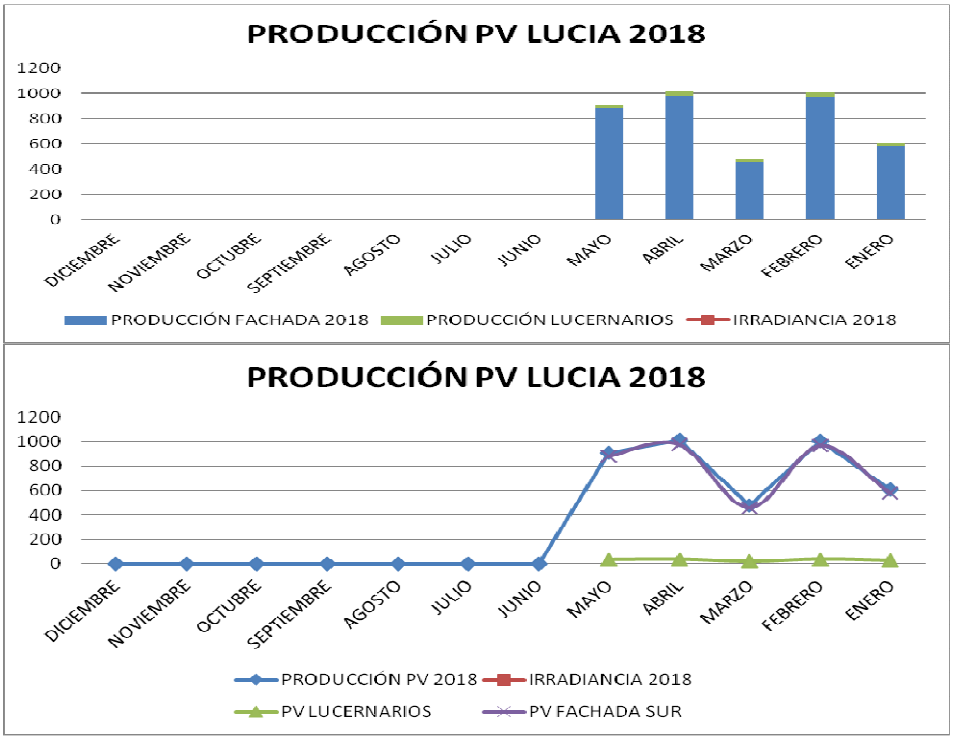


Fig. 12.- Producción fotovoltaica año 2018 en el edificio LUCIA

Del análisis de los datos obtenidos se pueden resaltar los siguientes aspectos:

a) La mayor parte de la aportación de energía eléctrica PV es debido a la fachada sur: 9976 kWh en el año 2016 sobre un total de 11483,5 kWh (un 86,82%), y 11280 kWh en el año 2017 sobre un

total de 12206,3 kWh (un 92,41%). De estos datos se pueden sacar algunas conclusiones que se indican a continuación:

- En primer lugar se aprecia una escasa aportación de los lucernarios, pues con una potencia instalada equivalente a la fachada sur y con unas estimaciones de generación también similares, queda lejos de los datos que se previeron inicialmente. Quizá la tecnología empleada desde el punto de vista de la generación no sea la más adecuada con un rendimiento menor que el policristalino, sin embargo se optó por el silicio amorfo con objeto de priorizar la obtención de iluminación natural en las zonas donde se instaló.
- En segundo lugar, por el contrario, se observa un mejor comportamiento de la fachada sur, con datos de generación mejor de los estimados, aunque esto puede ser en buena parte consecuencia de unas previsiones quizá demasiado conservadoras.
- En cualquier caso, aunque la aportación en su conjunto sea escasa (el consumo promedio del edificio un día laborable es de 1718 kWh/día), hay que valorar también la funcionalidad adicional de estas instalaciones, no sólo desde el punto de vista de la generación de energía eléctrica.

b) De un análisis más detallado de los datos se puede observar también que hay días en otoño/invierno donde el panel produce más energía que durante el verano. La orientación del mismo y la inclinación del sol en esos meses puede ser la causa.

5.2.- Consumo del edificio LUCIA

También se han realizado medidas encaminadas a conocer el consumo de energía eléctrica del edificio. Para ello se registraron los consumos del edificio entre el 27/02/2018 y el 1/07/2018, cuyo resultado, con la excepción de algunos días que por motivos técnicos no se puedo obtener dicho dato, se muestran en las figuras 13 y 14, donde en primer lugar aparece la potencia demandada y a continuación la energía consumida.

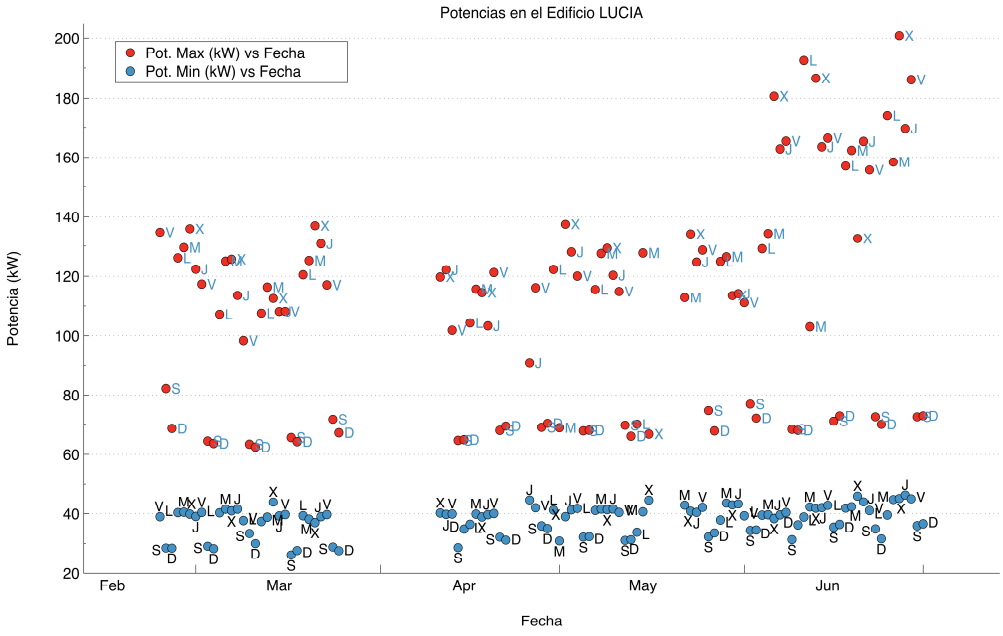


Fig. 13.- Potencia demandada en el edificio LUCIA

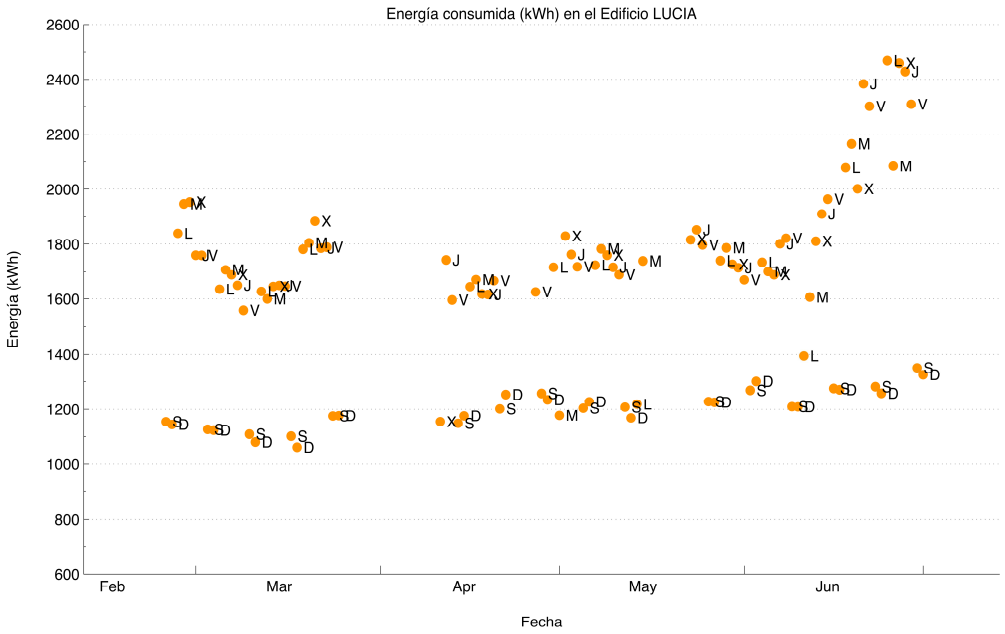


Fig. 14.- Energía demandada en el edificio LUCIA

Como complemento, se muestra seguidamente en las figuras 15 y 16, la evolución de la demanda de potencia de un día laborable y otro festivo.

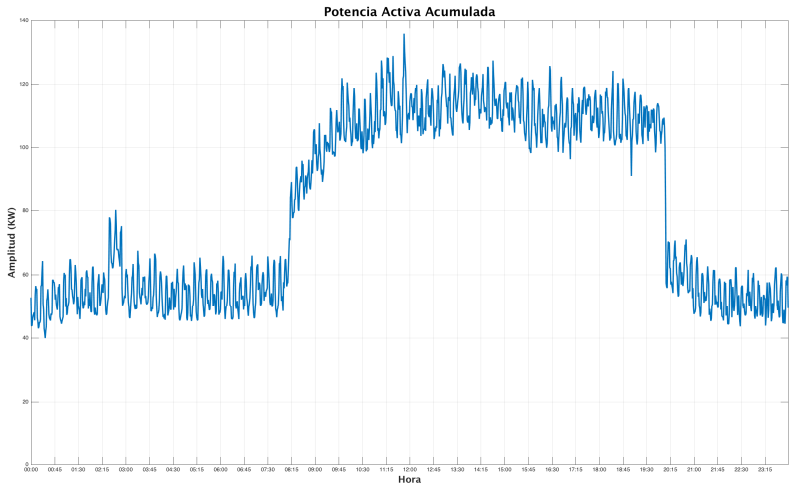


Fig. 15.- Demanda de potencia en un día laborable en el edificio LUCIA

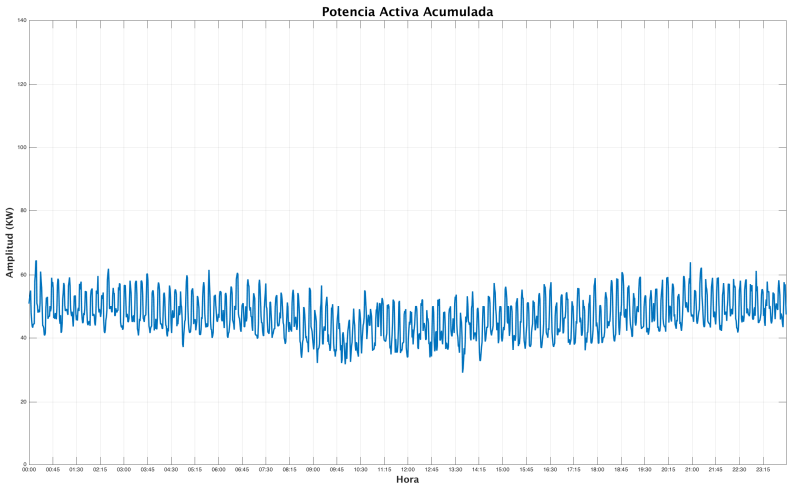


Fig. 16.- Demanda de potencia en un día no laborable en el edificio LUCIA

Del análisis de estas medidas realizadas se observa lo siguiente:

a) El edificio mantiene una demanda tanto en horas noche como en fines de semana elevada, con valores máximos promedios de 69 kW (el valor mínimo promedio está en 32 kW). Esto es debido a la existencia en este edificio de un Centro de Proceso de Datos de respaldo de la UVa y el equipo de acondicionamiento térmico asociado que requiere una demanda de energía eléctrica elevada.

b) También se aprecia un incremento en la demanda de energía eléctrica en verano como consecuencia de la climatización del edificio. Esto es debido a que el sistema de trigeneración descrito en el apartado 3 no se encuentra operativo y la climatización del edificio se realiza con equipos de refrigeración de compresión mecánica, que junto con equipos dispuestos en algunos laboratorios que requieren de un mayor acondicionamiento térmico hace que en estos meses el consumo se eleve.

c) En cualquier caso, se observa que la potencia máxima promedio del edificio en un día laborable se encuentra en los 130 kW, algo superior a la generación que se obtendría sumando la aportación del sistema de trigeneración instalado y la generación PV, y eso que el edificio en la actualidad no ha alcanzado su máxima ocupación, lo que indica que desde el punto de vista de la generación eléctrica no se conseguirá la autosuficiencia con los medios inicialmente previstos. Aunque sí se podría haber conseguido un balance neto generación vs consumo eléctrico de haberse conseguido operar de forma continua con el sistema de trigeneración, ya que este sistema se mantendría operativo las 24 horas, haciendo únicamente las paradas necesarias para su mantenimiento.

6.- Conclusiones

El proyecto del edificio LUCIA es una de las actuaciones más significativas que la Universidad de Valladolid ha llevado a cabo de forma continua y que ponen de manifiesto la importante apuesta por la sostenibilidad, la incorporación de energías renovables y la eficiencia energética de esta institución, con el objetivo de ser un referente nacional e internacional de “institución pública sostenible”. Como institución dedicada a la formación de profesionales e investigadores que liderarán el futuro de nuestra sociedad, la Universidad de Valladolid considera que debe dar ejemplo en la aplicación de prácticas y procedimientos sostenibles y de bajo impacto ambiental.

En este sentido, el edificio LUCIA cumple casi en su totalidad con los objetivos propuestos y su estudio y análisis permitirá concienciar a las nuevas generaciones sobre las responsabilidades relativas al

uso racional de la energía y a la gestión eficiente de los recursos en la actividad diaria desarrollada por cada ciudadano.

Sin embargo, transcurridos algo más de tres años desde su puesta en servicio, se puede resaltar, al menos en lo que a la aportación de energía eléctrica PV se refiere, que el uso de la tecnología empleada para la instalación de lucernarios y muro cortina cubierta ha quedado lejos de las expectativas previstas, aunque como se indicaba anteriormente, no sea ésta la única funcionalidad de los mismos. Además, la demanda del edifico es algo superior a lo esperado lo que hará que no pueda ser atendida en su totalidad con los medios inicialmente previstos.

Es intención de este grupo de trabajo seguir analizando este edificio, añadiendo en el futuro la obtención de datos de consumos segregados y sobre todo incluyendo el análisis de la calidad de la energía eléctrica en el mismo.

Agradecimientos

Los autores de este trabajo queremos mostrar nuestro agradecimiento a la oficina de Calidad Ambiental y Sostenibilidad, dependiente del Vicerrectorado de Patrimonio y Sostenibilidad de la Universidad de Valladolid por la información facilitada y su excelente disposición a la hora de facilitar la realización de medidas en las instalaciones del edificio LUCIA.

COM4RED: Aplicaciones y Servicios de NB-PLC en Nuevas Bandas de Frecuencia Aplicados a la Smart City

Noelia Uribe-Pérez[1], Ibon Arechalde[1], Amaia Arrinda[2], David de la Vega[2], Igor Fernández[2], Itziar Angulo[2], Txetxu Arzuaga[3]

[1] Tecnalia Research&Innovation, Parque Científico y Tecnológico de Bizkaia, Edificio 700, 48160 Derio - Bizkaia, Spain
[2] University of the Basque Country (UPV/EHU), Alda Urquijo s/n 4803 Bilbao, Spain
[3] ZIV Automation, Parque Científico y Tecnológico de Bizkaia, Edificio 210, 48170 Zamudio – Bizkaia, Spain
{noelia.uribe, ibon.arechalde}@tecnalia.com
{amaia.arrinda, david.delavega, igor.fernandez, itziar.angulo}@ehu.eus
txetxu.arzuaga@zivautomation.com

Abstract. La relación entre los paradigmas de la smart grid y la smart city viene de la estrecha dependencia de las ciudades en un sistema energético seguro, fiable, eficiente y en consonancia con los nuevos requisitos de sostenibilidad, integración de recursos distribuidos e inclusión activa de los consumidores finales. Es por ello que los avances de las TICs en el ámbito energético, agentes clave hacia las smart grids, suponen hoy más que nunca un avance también para las smart cities. En este contexto, la tecnología NB-PLC se ha posicionado como una de las más importantes para las smart grids. Con la ampliación de su uso a mayores frecuencias, NB-PLC mejora notablemente en términos de ancho de banda y robustez frente a interferencias, lo que permite plantear nuevos servicios y aplicaciones para la smart grid. Además, ofrece aplicaciones relacionadas con otros ámbitos de la smart city, como la automatización de servicios urbanos relacionados con el tráfico, la iluminación y el riego, entre otros. El estudio de estas nuevas posibilidades de NB-PLC a mayores frecuencias se aborda en el proyecto COM4RED, presentado en este artículo.

Keywords: Smart city, smart grid, PLC, servicios, energía.

1 Introducción

La infraestructura energética de una ciudad es probablemente la más importante, ya que, en caso de fallo, otros muchos servicios se verán afectados. Es por ello que los paradigmas de las redes eléctricas y las ciudades inteligentes del futuro, *smart grids* y *smart cities*, respectivamente, están estrechamente relacionados. Las funciones más importantes de las smart grids se podrían resumir en tres [1]: modernizan el sistema eléc-

trico mediante la implantación de microrredes y técnicas de auto-reparación, automatización, control y monitorización remotos; informan y educan a los consumidores sobre su comportamiento energético, costes y alternativas energéticas para convertirlos en usuarios proactivos; y facilitan la integración de los recursos energéticos distribuidos. Las smart cities dependen de las smart grids para asegurar un suministro energético seguro, eficiente, resiliente y sostenible a la vez que facilitan la coordinación entre el los gestores urbanos, los operadores de infraestructuras y el sector eléctrico. Algunas iniciativas como Kansas City Power and Light (Green Impact Zone Project) [2], y Smartcity Málaga [3] ponen de manifiesto que esta interrelación entre ciudades y smart grids ya se está empezando a abordar. En el caso de Kansas, además de una importante infraestructura de soporte a los vehículos eléctricos o EVs (*electric vehicle)*, con más de 1000 puntos de recarga, están desarrollando un concepto de smart grid basado en el estándar IEC 61850 que incluye generación y distribución avanzadas así como tecnologías a nivel de cliente, a los cuales se les informa de los suministros y consumos en tiempo real, lo que supone un plus de eficiencia y fiabilidad energética. La red cuenta con recursos renovables locales que inyectan a la red y abastecen a 14000 clientes comerciales y residenciales. Por su parte, Smartcity Málaga se ha planteado como un escenario real de movilidad eléctrica a través de la implantación de nuevos servicios como la gestión de la recarga de vehículos, la doble direccionalidad de la carga o V2G (*Vehicle to Grid)* o los servicios de carga rápida situados en zonas estratégicas de la ciudad. También se ha desplegado una red de contadores domésticos digitales para monitorizar tanto la gestión del agua como la del consumo energético, lo que permite racionalizar el consumo y disminuir la factura. Otra iniciativa relevante es Co-op City, en la que más de 50000 residentes están conectados a una red comunitaria de calor y energía o CHP (*Combined Heat and Power*) de 38 MW, siendo una de las mayores cooperativas de este tipo a nivel mundial [4].

Pese a que no existe una tecnología líder en el contexto de las smart grids, los buenos resultados obtenidos hasta ahora en las aplicaciones de telelectura y gestión de red mediante las comunicaciones por la red eléctrica de banda estrecha o NB-PLC (*Narrow Band - Power Line Communications*) posicionan a esta tecnología como clave en el sector. Además, permiten prever un importante cambio en el uso de la red eléctrica, con el despliegue de nuevos servicios y aplicaciones basados en la interactividad con el usuario y nuevas formas de gestión distribuida. Esto supone abordar aplicaciones más allá de los sistemas de medida avanzada o AMI (*advanced metering infrastructure*), aplicación habitual de la tecnología NB-PLC. Estos aspectos se abordan en el proyecto COM4RED, detallado a continuación.

2 Proyecto COM4RED

El éxito de NB-PLC en aplicaciones AMI y relacionadas ha quedado de manifiesto con multitud de despliegues en todo el mundo, tal y como se refleja en la **Tabla *1***. Tanto es así que ya se habla de una nueva generación de contadores inteligentes para 2020, que permitirá un mayor número de servicios, basados en nuevas técnicas de transmisión de datos, en un rango más amplio de frecuencias. Por lo tanto, se representa una etapa en

la que se vislumbran cambios importantes en la evolución de las smart grids y, por extensión, a nuevos paradigmas relacionados como las smart cities. Por esta razón, es el momento de investigar en nuevas propuestas tecnológicas y generar conocimiento para desarrollar soluciones innovadoras.

	ITU-T G.9904 (PRIME)	ITU-T G.9903 (G3-PLC)	IEEE 1901.2
Pilots	Luxemburg, Australia, United Kingdom, Portugal, Russia	China, Korea, Taiwan, Malaysia, India, Austria, Germany, Mexico, Norway, Finland, Belgium, Algeria	Hong-Kong
Massive Deployments	Spain (almost 5 million installed), Poland	Japan (tens of millions), France (starting early 2016 for tens of millions), Luxemburg	

Tabla 1. Relación de pilotos y despliegues NB-PLC a nivel mundial [5]

En este contexto de cambio, surge el proyecto COM4RED, cuyas siglas corresponden a *Investigación de las COMunicaciones PLC para la RED eléctrica en nuevas bandas de frecuencia*. El objetivo general de este proyecto es la investigación del comportamiento de las redes eléctricas para su uso como medio de transmisión de comunicaciones en bandas de frecuencia no utilizadas hasta ahora en el mercado europeo. El proyecto aborda el estudio de las posibilidades de las nuevas bandas de frecuencia para la introducción de nuevos servicios y de nuevas técnicas de transmisión de datos en las smart grids, adaptadas a las características y peculiaridades del medio eléctrico en estas nuevas frecuencias, que optimicen el rendimiento de una nueva generación de comunicaciones, dando respuesta a los exigentes requisitos de fiabilidad, rapidez, capacidad y alcance que se requieren. También se proponen nuevos servicios y aplicaciones, basados en las comunicaciones en estas nuevas frecuencias, que mejoren la gestión de la red y fomenten nuevos desarrollos asociados al consumo energético. Además, dado el abanico de posibilidades que presenta NB-PLC, se presentan nuevas aplicaciones y servicios relacionadas estrechamente con las smart cities.

3 Ampliación del uso de frecuencias de NB-PLC

En Europa, la banda A definida por CENELEC (Comité Europeo de Normalización Electrotécnica) está reservada para despliegues de sistemas PLC conformes a EN 50065-1 como norma armonizada [6]. Esta banda A comprende frecuencias de 3 kHz a 95 kHz y está reservada para proveedores y distribuidores de electricidad. La norma EN 50065-1 también fija ciertos límites para las transmisiones en las llamadas bandas B, C y D, de 95 kHz a 148,5 kHz, definidas para usarse en otros entornos, como las aplicaciones en el hogar. Debido a eso, las implementaciones iniciales y los despliegues de contadores inteligentes han estado utilizando la banda CENELEC- A. Sin embargo, siguiendo el ejemplo de los normativa de América (regulada por la Comisión Federal de Comunicaciones, FCC) y Asia (que se acoge a los límites definidos por la Asociación de Industria y Negocios Radio, ARIB), donde las frecuencias de 150 kHz a 500 kHz han sido utilizadas históricamente, varios mercados europeos están empezando a considerarlas en su hoja de ruta, tal y como se recoge en la Figura 1. Hay dos razones principales para esta extensión de banda: el aumento del ancho de banda proporcionado por la tecnología y la prevención de interferencias procedentes de otros dispositivos, que normalmente se encuentran a frecuencias menores.

El aumento del ancho de banda está claramente orientado por las crecientes necesidades de intercambio de información en la red de distribución de baja tensión debido a los nuevos servicios y aplicaciones que se están desarrollando. Por ejemplo, la automatización de la distribución de baja tensión, las operaciones de medición a distancia en tiempo real, la integración de recursos de la generación distribuida (DER) y la detección de redes aisladas.

En cuanto a las interferencias, las normas de Compatibilidad Electromagnética (CEM) se utilizan en todo tipo de equipos eléctricos, electrónicos o de telecomunicaciones, independientemente de su uso en redes inteligentes o no. Los estándares CEM intentan prevenir la existencia de interferencias en estas bandas de frecuencia. Sin embargo, debido a un vacío de definición en la estandarización de algunas bandas de frecuencias particulares, son bien conocidos por la comunidad los problemas producidos por interferencias en dispositivos PLC (por ejemplo, los resultados observados por el Smart Metering Coordination Group, -SMCG-, comité que agrupa representantes de CEN, CENELEC, y ETSI y que analiza los fallos a nivel de estandarización que existen en las comunicaciones PLC, como consecuencia del Mandato M/441 para contadores inteligentes y el mandato M/490 para las redes inteligentes a las organizaciones europeas de normalización CEN, CENELEC y ETSI). En 2015, CENELEC SC 205A publicó la tercera edición del Informe de Estudio sobre "Interferencias Electromagnéticas entre Equipos Eléctricos en la Gama de Frecuencias de 2 a 150 kHz" [7]. Las interferencias recogidas en este informe afectan a las tecnologías PLC existentes de diferentes maneras, e incluso dentro de la misma tecnología el efecto es diferente en cada implementación.

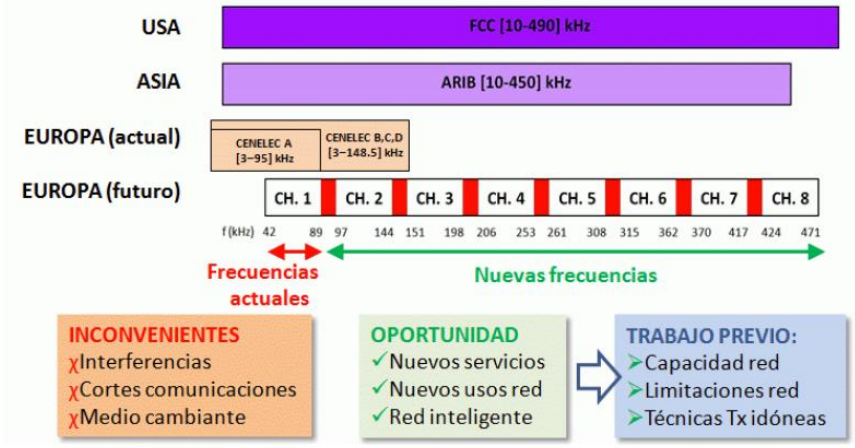


Figura 1. Ampliación de nuevas frecuencias para NB-PLC.

4 Nuevos servicios de NB-PLC a mayores frecuencias

Una de las ventajas más importantes de PLC es su gran potencial de cobertura debido al uso del cableado eléctrico, que hace que cualquier dispositivo conectado a la red sea

potencial candidato de las aplicaciones desarrolladas vía PLC [8]. Además, la instalación del medio ya existe, es bien conocida y estable. Otra característica especialmente valiosa de la tecnología PLC es que la presencia de obstáculos físicos no afecta a su operativa. Por ejemplo, en áreas metropolitanas muy urbanizadas, las atenuaciones en las comunicaciones inalámbricas son altas, llegando a situaciones en las que incluso pueden cancelarse. Además, es habitual que los contadores estén instalados en los sótanos de los edificios, por lo que las comunicaciones subterráneas también suponen un desafío para las alternativas inalámbricas. Por ejemplo, la comunicación entre los gestores energéticos de las viviendas y los contadores ubicados en los sótanos estaría en entredicho en este contexto.

Debido a que la tecnología PLC utiliza el cableado eléctrico para las comunicaciones, es habitual encontrar sus aplicaciones clasificadas según la sección de la red eléctrica [8] [9]. Por ejemplo, en alta tensión o HV (*high voltage*) destacan las aplicaciones relacionadas con el control de suministro, la detección de fallos, sistemas SCADA y el control remoto. En media tensión o MV (*medium voltage*) es común encontrar aplicaciones extendidas de la sección HV además de otras como la automatización de la distribución, los servicios de diagnóstico y servicios relacionados con la gestión de recursos distribuidos o DER (*distributed energy resources)*. Por su parte, la sección de baja tensión o LV (*low voltage)* vive un auge actual gracias a los sistemas avanzados de medida o AMI (*advanced metering infrastructure*). Además, caben mencionar otras aplicaciones como las relacionadas con los EVs, la gestión de la demanda o DSM (*Demand Side Management*) y los servicios a nivel doméstico, además de las previamentecitadas gestión de DERs y aplicaciones de diagnóstico.

Focalizando en la versión NB de PLC, el uso de estas tecnologías se ciñe a los servicios que las compañías eléctricas deben proporcionar obligatoriamente a los usuarios del suministro eléctrico. Aunque la forma de proporcionar el servicio es diferente dependiendo de la compañía eléctrica, la mayoría de ellas proporcionan ya a sus usuarios la posibilidad de acceder a su consumo eléctrico del día anterior a través de la gráfica de la curva de demanda. Sin embargo, las capacidades de los propios contadores permiten acceder a más información. Por un lado, una parte de esa información es relevante para la compañía eléctrica, ya que le permite controlar de manera más exhaustiva el uso de su red. El control puede ser necesario por razones puramente técnicas (balance energético de la red, reducción de situaciones extremas que limiten apagones o envejecimiento prematuro del equipamiento de la red, calidad del suministro…) o por razones de vigilancia del buen uso de la red (detección de fraude, detección de equipamiento inadecuado…), en combinación con algunas aplicaciones comentadas con anterioridad. Otra parte de esa información puede ser relevante para el propio usuario, ya que conocer mejor su consumo le puede permitir ajustar su contrato con la compañía, modificar sus hábitos de consumo para ajustarse a periodos con tarifas menos costosas, analizar la relevancia de comprar equipos energéticamente más eficientes e incluso asociar esos datos con equipos de gestión energética doméstica.

En cuanto a las aplicaciones centradas a la smart city, las posibilidades de NB-PLC a mayores frecuencias son múltiples. El aumento de la tasa de bit y la robustez frente a interferencias permite pensar en aplicaciones que antes no se tenían en consideración.

A continuación, se desarrollan los principales servicios, recogidos de forma sintética además en la Tabla 2:

- Aplicaciones relacionadas con la **smart grid**. El rol de PLC y de NB-PLC ha sido ampliamente abordado en la literatura en el paradigma de las redes eléctricas inteligentes [10],[11],[12]. En cambio, algunas aplicaciones estrictas desde el punto de vista de requisitos (ancho de banda, latencia) que habitualmente habían sido descartadas para NB-PLC, encuentran cabida con la ampliación de frecuencias. Entre ellas cabe mencionar la automatización de la distribución, las tareas de vigilancia y seguridad, y la detección y corrección de fallos. Además, merece la pena destacar la figura de las **plantas virtuales** o VPP (*virtual power plants)*, que permiten integrar de forma eficiente los recursos energéticos en la red. El sistema energético de una VPP se comunica de forma bidireccional con el recurso en cuestión (almacenamiento o generación) e intercambian datos energéticos, precios, consignas de operación y señales de estado que permiten la integración del recurso en forma y tiempo. La exigencia en términos de ancho de banda y latencia es elevada, además de precisar de un sistema de comunicaciones fiable y robusto, por lo que es habitual encontrar pilotos implementados con fibra óptica y tecnologías celulares [13], [14]. Con la nueva ampliación de frecuencias en NB-PLC, ésta se convierte en una tecnología a considerar en futuros pilotos.

- En línea con lo anterior, la gestión de **recursos distribuidos** de una ciudad podría hacerse con NB-PLC. En un contexto cada vez más sostenible, las ciudades tienden a adoptar alternativas energéticas que les permitan cumplir con las exigencias europeas en cuanto a emisiones y sostenibilidad. Por ejemplo, cada vez es más común encontrar redes de distrito de calor, cuya operativa, monitorización y mantenimiento podrían implementarse con las nuevas versiones de NB-PLC. En cuanto a los datos de medida, la gestión de estos recursos se puede hacer desde tres puntos de vista [15]:
    - Bajo demanda: los contadores asociados a cada recurso se interrogan cuando se precisa, por ejemplo, cuando el gestor necesita información o bien en el proceso de toma de decisiones. En el caso en el que sea para una toma de decisiones, la fiabilidad y respuesta del sistema de comunicaciones puede ser crítica.
    - Programada: proporciona los datos de medida de forma regular, por ejemplo, varias veces al día. El aumento de la tasa de bit que proporciona NB-PLC en las nuevas frecuencias permite no sólo incrementar esta periodicidad sino hacerlo para bloques de información más grande y en menos tiempo.
    - Transferencia íntegra: bajo este método se recopila toda la información almacenada por los contadores. Aunque los requisitos dependen mucho del número de equipos involucrados, en general no se precisan tiempos reales, pero si robustez de las comunicaciones, debido al gran volumen de datos.

- Servicios para **usuarios finales**. El consumo energético a nivel doméstico supone un importante porcentaje del gasto energético global (en la UE hasta un 25% del total en 2015, según datos de Eurostat). Dichos consumos energéticos pueden ser gestionados de forma eficiente mediante gestores energéticos o EMS (*Energy Management System*), que realizan no sólo la gestión energética a través de la monitorización de los recursos, sino que también permiten al usuario ser consciente de su consumo en todo momento. Además, en la gestión energética doméstica se podrían incluir contadores de agua y de gas. Los sistemas EMS se pueden dividir en dos grandes grupos:
    - Sistemas autónomos: reciben señales dinámicas con las variaciones del precio de la electricidad y actúan en consecuencia;
    - Sistemas pasivos: monitorizan los recursos y los muestran de forma intuitiva para concienciar al usuario final con el objetivo de influir en sus hábitos energéticos.

  El papel del nuevo perfil de consumidor, el consumidor-productor o ***prosumer***, se considera un importante agente en el contexto energético próximo. Los usuarios pueden participar en el mercado energético de forma dinámica, y de forma bidireccional ya que, llegado el caso, los usuarios pueden verter sus excedentes energéticos a cambio de beneficios en la factura o compensaciones económicas. Los esquemas de gestión de este tipo de usuarios se pueden clasificar en dos grandes grupos [16], de forma individual, en la que existe un intercambio directo de energía entre el *prosumer* y la compañía eléctrica; y la integración grupal, donde diferentes grupos que aúnan a su vez diversos usuarios con múltiples perfiles de generación y consumo subastan su energía a la red. Estos grupos se suelen abordan dentro del estudio de las VPP o de servicios de microgeneración. La integración individual es el enfoque que más se ha abordado hasta ahora, especialmente la gestión del lado de la demanda o **DSM** (*Demand Side Management*). En general, los programas DSM se hacen a través de una serie de medidas que provocan que los usuarios cambien sus perfiles de consumo para reducir o trasladar sus consumos en el tiempo. Los usuarios participan en el mercado energético cambiando sus hábitos energéticos en vez de regirse por precios fijos, lo que se traslada en beneficios tanto para los usuarios como para las compañías eléctricas. Las medidas empleadas en DSM se pueden clasificar en cinco grandes niveles de acuerdo a su influencia sobre la curva de carga de la demanda [17]:
    - Programas de ahorro y de eficiencia: se trata de iniciativas que promocionan el aumento de la eficiencia energética en los dispositivos. Su efecto sobre la demanda eléctrica es indirecto, con efectos de largo plazo, y enfocados exclusivamente a reducir la potencia consumida, sin considerar el horario de consumo. Un ejemplo de este tipo de medidas es la renovación de electrodomésticos, sustituyendo los antiguos por otros más eficientes.
    - Programas de control de cargas eléctricas indirecto mediante tarificación: en este caso se envían señales de precio a los consumidores y su

respuesta variará según su reacción frente a los precios que va adoptando la electricidad en diferentes periodos del día. Las modalidades más extendidas de este tipo de programas, también conocidas como tarificación dinámica son las tarifas de periodo de utilización o TOU (*Time of Use*), las tarifas de período crítico o CPP (*Critical Peak Pricing*) y las tarifas en tiempo real o RTP (*Real Time Pricing*).

  - Programas de control indirecto de cargas eléctricas mediante contratos o incentivos: los usuarios son compensados económicamente (pagos directos o reducciones en la tarifa) cuando reducen su consumo durante los picos de demanda en el sistema. Este nivel agrupa a las medidas que precisan de la participación del consumidor, que decide si hacerlo o no en base a sus necesidades energéticas y al precio de la energía. En estos programas resulta vital contar con un buen sistema de comunicaciones.
  - Programas de control directo de cargas eléctricas: en este caso el operador de la red tiene acceso total a los dispositivos del usuario, para lo cual envía señales a los controladores de las cargas para encender o apagar determinados dispositivos de acuerdo con las necesidades del sistema mediante un relé. Este tipo de relés se activan cuando la tensión de frecuencia o señal sobrepasa el umbral configurado. Dispositivos habituales en este tipo de programas son los sistemas de aire acondicionado, las bombas de calor y los calentadores de agua eléctricos. Estos programas precisan de un sistema de comunicaciones fiable y robusto entre la compañía y los usuarios.
  - Programas de mercados de gestión de la demanda o DSB (Demand *Side Bidding*): permite que los usuarios participen ofertando reducciones en su consumo a un precio determinado. El usuario ha de encargarse de la reducción de la carga si la oferta es aceptada.

- **EVs**: el éxito del vehículo eléctrico y su integración en los nuevos paradigmas (smart grids y smart cities) depende en gran medida de los sistemas de comunicación implementados. A su vez, los requisitos de estos sistemas varían según la aplicación final, pero a medida que aumenta la complejidad de ésta (por ejemplo, en aplicaciones de balanceado de carga), se precisan sistemas de comunicaciones con mayores tasas de bits y baja latencia. La integración de EVs puede aportar importantes beneficios al sector eléctrico (suavizado de picos de consumo, solución a la intermitencia de las renovables) así como a los usuarios (posibilidad de autoabastecimiento, beneficios en el tránsito urbano, ventajas fiscales), además de su contribución global a la reducción de emisiones y la sostenibilidad en el parque móvil. Respecto a la idoneidad de PLC, existen algunas referencias en la literatura sobre su aplicación, resultando viable salvo en términos de interferencias, ya que se han detectado escenarios de ruidos que afectan a las comunicaciones [18]. Con la nueva ampliación en frecuencias, esta problemática disminuiría. En general, se pueden agrupar los servicios asociados a EVs, en términos de comunicaciones, en dos:

  - Operación V2G, en la cual se produce un flujo de la energía almacenada en el coche hacia la red. Básicamente, está operando como una batería portátil, por lo que también podría considerarse un DER. Durante esta operación, es necesario monitorizar tanto el estado de la red como el del vehículo, así como medir la energía transferida. Existen múltiples referencias en la literatura sobre la integración de la modalidad V2G. En ellas se pone de manifiesto la importancia de las comunicaciones involucradas [19] [20].
  - El proceso de carga del vehículo, también denominado V2G unidireccional, implica en sí mismo una monitorización. Idealmente, las operaciones de carga han de hacerse de acuerdo a parámetros externos tales como el estado de la red, la producción de energía renovable o incluso precios de la electricidad.

- **Servicios adicionales** para la smart city. Existen multitud de servicios que las ciudades pretenden automatizar cada vez más como, por ejemplo, la iluminación, los sistemas de riego, la gestión del tráfico y la gestión de incidencias, entre otros muchos. Todos ellos tienen en común que precisan de una infraestructura de monitorización basada en un sistema de comunicaciones, por lo general, de carácter bidireccional. Además, muchas aplicaciones van ligadas al cableado eléctrico (como las farolas o los semáforos), por lo que el uso de PLC sería una ventaja en ese sentido. Existen ejemplos de implementación exitosa de la actual versión de NB-PLC en algunas aplicaciones sencillas, como la iluminación [21] [22]. Por lo tanto, el uso de NB-PLC en mayores frecuencias permitiría su aplicación en futuros servicios, como los especificados por ISO [23] [24].

Aplicación	**Descripción**
Smart grid	Automatización de la distribución, tareas de vigilancia y seguridad, detección y corrección de fallos, control de plantas virtuales, detección de fraudes.
Gestión de recursos distribuidos	Redes CHP, generación renovable, sistemas de almacenamiento.
Servicios a usuarios finales	Gestión energética doméstica, gestión de la demanda.
EVs	Control de cargas, sistemas V2G.
Servicios urbanos	Iluminación, tráfico, residuos.

Tabla 2. Posibilidades de NB-PLC en las nuevas frecuencias en el contexto de la smart city.

5 Validación de servicios *in situ*

Para validar y contrastar los resultados obtenidos en los estudios teóricos, así como las nuevas aplicaciones surgidas de la ampliación de frecuencias en NB-PLC, resulta fun-

damental ponerlos en práctica en un entorno lo más similar posible al destino final (entorno real) e idealmente controlado, a diferencia de las condiciones habituales del escenario real. Para ello, se ha elaborado un novedoso entorno aislado en las dependencias de TECNALIA que permite realizar medidas en múltiples configuraciones, tal y como se puede ver en la Figura 2 [25]. La red se compone de un total de 16 conmutadores (denominados como 4.1-x y 4.2-x) que permiten aislar o incluir determinadas secciones de la red. Además, la longitud es configurable, ya que hay varias cocas de cable eléctrico, localizado en bandejas aéreas en las instalaciones de TECNALIA y similar al empleado en los despliegues eléctricos reales, tanto de tipo aéreo como subterráneo. La Figura 3 muestra unas imágenes de la disposición de los elementos y del cableado. En total, se dispone de las siguientes combinaciones:

- 1500 m de cable aéreo;
- 1000 m de cable aéreo;
- 500 m de cable aéreo;
- 500 m de cable subterráneo.

Además, el uso de los conmutadores permite la inclusión o no en la red de hasta 8 armarios de contadores, similares a los empleados en los despliegues reales y denotados como cuadros en la Figura 2. A su vez, los armarios de contadores permiten la conexión de hasta 9 contadores eléctricos monofásicos y 1 contador trifásico.

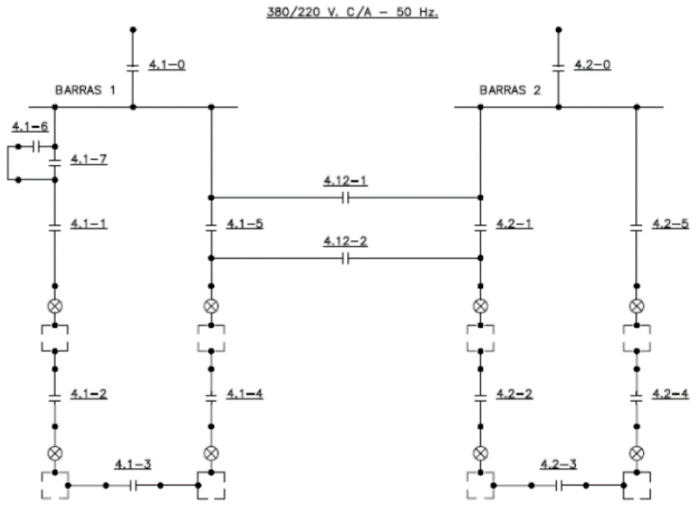


Figura 2. Esquema de la red controlada propuesta como escenario de medidas.



Figura 3. Imágenes de la red aislada y del despliegue de cableado.

Una instalación de este tipo permite trasladar a un entorno controlado una sección de la red eléctrica. Dentro de la complejidad que entraña esta, se pueden identificar algunos de los elementos más influyentes en la operativa de las comunicaciones y que se pueden parametrizar de acuerdo a la Tabla 3.

Elemento	**Parámetros**
Cable	Atenuación, longitud, influencia en la inducción e impedancia.
Conectores	Atenuación, influencia en la impedancia.
Cargas	Impedancia con el tiempo/frecuencia, potencia, ruidos.
Transmisor	Rangos de corriente, impedancia, ruidos.
Receptor	Rangos de corriente, impedancia, ruidos.

Tabla 3. Parametrización de los elementos más importantes de una sección de distribución eléctrica para las comunicaciones.

Un parámetro de suma importancia para las operativa de PLC es la impedancia que encuentre a su paso, ya que la cantidad de señal acoplada por un transmisor PLC a la red eléctrica depende de la impedancia de entrada que presenta la línea en cada instante. Se trata de una impedancia variable con la frecuencia y con el tiempo, que además depende de las características constructivas de la línea eléctrica, su topología y de las diferentes cargas que están conectadas en cada momento, así como de su conexión y desconexión, entre otros. Es por ello que, para profundizar en la caracterización de la red eléctrica como medio de comunicaciones, se han diseñado unas impedancias en base a medidas reales de diferentes entornos domésticos [26], tal y como se describe en la Tabla 4 para estudiar su influencia en PLC.

Tabla 4. Relación de impedancias fabricadas y características.

Identificación de impedancia	**Características**

Tipo 1	Apartamento de 90 m^2, con los siguientes equipos conectados: frigorífico, horno microondas, lavavajillas, lavadora, teléfono inalámbrico, dos televisores de 29''y 14'', ordenador de sobremesa, sistema de música y reproductor DVD.
Tipo 2	Casa de 120 m^2, con los siguientes equipos conectados: frigorífico, horno microondas, lavavajillas, televisor de 20'', sistema de música y reproductor DVD.
Tipo 3	Apartamento de 60 m^2, con los siguientes equipos conectados: frigorífico, horno microondas y televisor de 20 ''.
Tipo 4	Casa de 150 m^2, con los siguientes equipos conectados: frigorífico, congelador, horno microondas, lavavajillas, lavadora, teléfono inalámbrico, dos televisores de 29''y 20'', ordenador de sobremesa, sistema de música y reproductor DVD.
Tipo 5	Apartamento de 75 m^2, con los siguientes equipos conectados: frigorífico, horno microondas, televisor de 20'' y lavadora.

6 Conclusiones

El uso de NB-PLC a mayores frecuencias presenta una notable mejora del ancho de banda disponible y robustez frente a interferencias que amplía los horizontes de las aplicaciones implementadas hasta ahora. En este sentido, el proyecto COM4RED aborda el estudio de las posibilidades de las nuevas bandas de frecuencia para la introducción de nuevos servicios y aplicaciones no sólo para las smart grids sino también para las smart cities. Aspectos como la gestión de recursos distribuidos, servicios para el usuario final, el vehículo eléctrico, y nuevos servicios para las ciudades se consideran en este estudio. Así mismo, se presentan las instalaciones de TECNALIA como un novedoso entorno real de validación de nuevos servicios.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Gobierno Vasco bajo el programa ELKARTEK KK-2017/00071.

Referencias

1. Geisler, K. The Relationship Between Smart Grids and Smart Cities. IEEE Smart Grid Committee (2013).
2. Kansas City Power and Light (Green Impact Zone Smart Grid Demonstration) Disponible online: https://www.smartgrid.gov/project/kansas_city_power_and_light_green_impact_zone_smartgrid_demonstration.html

3. Smartcity Málaga. Disponible online: https://www.endesa.com/content/dam/enel-es/home/prensa/publicaciones/otraspublicaciones/documentos/SMARTCITY%20MALAGA%20UN%20MODELO%20DE%20GESTION%20ENERGETICA%20SOSTENIBLE.pdf
4. Co-op City. Disponible online: https://en.wikipedia.org/wiki/Co-op_City,_Bronx
5. S. Galli and T. Lys, "Next generation Narrowband (under 500 kHz) Power Line Communications (PLC) standards," in *China Communications*, vol. 12, no. 3, pp. 1-8, Mar. 2015.
6. Norma EN 50065-1. Transmisión de señales por la red eléctrica de baja tensión en la banda de frecuencias de 3 kHz a 148,5 kHz.
7. CENELEC SC205A. Study report on electromagnetic interference between electrical equipment/systems in the frequency range below 150 kHz.
8. Uribe-Pérez, N.; Angulo, I.; de la Vega, D.; Arzuaga, T.; Fernández, I.; Arrinda, A. Smart Grid Applications for a Practical Implementation of IP over Narrowband Power Line Communications. Energies, 10, 1782 (2017).
9. Amarsingh, A. A.; Latchman, H. A. and Yang, D. Narrowband Power Line Communications: Enabling the Smart Grid. IEEE Potentials, 33, 1, 16-21, (2014).
10. Galli, S.; Scaglione, A. and Wang, Z. For the Grid and Through the Grid: The Role of Power Line Communications in the Smart Grid. Proceedings of the IEEE, 99, 6, 998-1027 (2011).
11. Berger, L.T.; Schwager, A. and Escudero-Garzás, J.J. Power Line Communications for Smart Grid Applications. Journal of Electrical and Computer Engineering, 712376, (2013).
12. Berganza, I., Bumiller, G., Dabak, A., Lehnert, R., Mengi, A., & Sendin, A. PLC for Smart Grid. Power Line Communications: Principles, Standards and Applications from Multimedia to Smart Grid, 509-561, (2016).
13. Kolenc, M.; Nemček, P.; Gutschi, C.; Suljanović, N. and Zajc, M. Performance evaluation of a virtual power plant communication system providing ancillary services, Electric Power Systems Research, 149, 46-54, (2017).
14. Rinaldi, S.; Pasetti, M.; Ferrari, P.; Massa, G. and Della Giustina, D. Experimental characterization of communication infrastructure for virtual power plant monitoring. IEEE International Workshop on Applied Measurements for Power Systems (AMPS), 1-6 (2016).
15. Kuzlu, M.; Pipattanasomporn, M. and Rahman, S. Communication network requirements for major smart grid applications in HAN, NAN and WAN. Comput. Netw. 67, 74–88, (2014).
16. Rathnayaka, A.J.D.; Potdar, V.M. and Kuruppu, S.J. An innovative approach to manage prosumers in Smart Grid. In Proceedings of the World Congress on Sustainable Technologies (WCST), Cambridge, UK, 11–14, 141–146 (2011).
17. Fenercom. Guía Básica de la Gestión de la Demanda Energética. Disponible online: https://www.fenercom.com/pdf/publicaciones/guia-basica-de-la-gestion-de-la-demanda-energetica-fenercom.pdf
18. Barmada, S.; Raugi, M.; Tucci, M. and Zheng, T. Power Line Communication in a full electric vehicle: Measurements, modelling and analysis. IEEE ISPLC 2010 - International Symposium on Power Line Communications and its Applications, 331 – 336 (2010).
19. Miao-Tan, K.; Ramachandaramurthy, V. K. and Ying Yong, J. Integration of electric vehicles in smart grid: A review on vehicle to grid technologies and optimization techniques, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 53, 720-732, (2016).
20. D. Galus, M.; Gonzalez Vaya, M.; Krause, T. and Andersson, G. The role of electric vehicles in smart grids. WIREs Energy Environment, 2, 384–400, (2013).
21. Ikpehai, A.; Adebisi, B. and Kharel, R. Smart street lighting over narrowband PLC in a smart city: The Triangulum case study. In Computer Aided Modelling and Design of Communication Links and Networks (CAMAD), IEEE 21st International Workshop, 242-247 (2016).

22. Golchin, P.; Tosato, P. and Brunelli, D. Zero-energy wake up for power line communications in smart cities. IEEE International Smart Cities Conference (ISC2). 1-6 (2016).
23. ISO and Smart Cities. Disponible online: https://www.iso.org/files/live/sites/iso-org/files/store/en/PUB100423.pdf
24. Uribe-Pérez, N. and Pous, C. A novel communication system approach for a Smart City based on the human nervous system, Future Generation Computer Systems, 76, 314-328 (2017).
25. Arechalde, I; Uribe-Pérez, N.; Gandarias, J.; Arrinda, A.; Fernández, I.; Angulo, I. and de la Vega, D. Facilities in laboratory for the benchmarking of products for new services over NB-PLC. IEEE International Symposium on Power Line Communications and its Applications (ISPLC), 1-5, (2018).
26. Bassi W. High frequency input impedance modelling of low-voltage residential installations - influence on lightning overvoltage simulations results. SpringerPlus. 3:690, (2014).

Prototyping a Horizontal Water Wheel for Electricity Generation in a Small Museum: The House of Silk

Iago Dalmarco[1,2], Paulo Araujo[1], Vicente Leite[1], Luís Queijo[1], Luiz Lima[2]

[1]Polytechnic Institute of Bragança, Bragança 5300-253, Portugal
phxaraujo@gmail.com, avtl@ipb.pt, lqueijo@ipb.pt
[2]Technological Federal University of Paraná, Ponta Grossa 84016-210, Brazil
iago.icd@gmail.com, lelima@utfpr.edu.br

Abstract. The House of Silk of the "Ciência Viva" Science Centre of Bragança. Portugal is, nowadays, a small museum dedicated to the dissemination of science. In the 20th century, it was a former water mill and its original infrastructures have been preserved. Taking advantage of this and recovering its historical heritage, this paper presents the design of a horizontal water wheel for electricity generation for the House of Silk. The water wheel and a permanent magnet synchronous generator will be connected to a microgrid using an innovative strategy based on widely available photovoltaic inverters. Thus, this pico-hydro system will be an additional energy source for the microgrid that is being installed in the context of the Project SilkHouse – development of a smart microgrid based on renewable energy sources and a monitoring system for the House of Silk. In the end of this project, the pico-hydro turbine based on the water wheel will be interactive, for experimentation by visitors and, together to the low head propeller turbine and the photovoltaic system, will make the House of Silk a real model for the dissemination of such solutions and reference for future efficient homes in smart cities.

Keywords: Water Wheel, Pico-hydro, Microgrid.

1 Introdução

Historicamente, a força motriz para acionar serrações, sistemas de bombagem, foles para fornos, trituradores, moagem de cereais e oficinas de artesanato, advinha de rodas de água. Sabe-se que a roda de água é usada há milhares de anos. Foi utilizada pelos Egípcios em 3000 a.C. e por povos do Médio Oriente em 1000 a.C. Em 100 a.C., pelos Romanos, com um rendimento considerável, nomeadamente em aplicações com baixas quedas, em mecanismos rudimentares, com o arquiteto Marcus Vitruvius. Mais tarde, com a revolução industrial, no século XVIII, entrou em decadência [1].

A roda de água foi ainda muito utilizada na moagem de cereais, ao longo do século XX, encontrando-se muitas dessas infraestruturas, ainda hoje, em razoável estado de conservação. Muitos moinhos de água foram conservados ou mesmo reconstruídos. Foi o que aconteceu com a Casa da Seda, do Centro de Ciência Viva de Bragança, Portugal.

A Casa da Seda (**Fig. 1**) está localizada numa zona, junto ao rio Fervença, onde se costumava tingir sedas, no século XVIII. Nos séculos XIX e XX, funcionou como um moinho. Mais tarde, no século XX, tornou-se propriedade de um casal que a explorou para fazer pão e biscoitos regionais, usando o potencial da fábrica e até mesmo trabalhou como taberna. Em 1990, foi comprada pelo Município de Bragança e foi recuperada, em 2006, no âmbito de um programa de requalificação da zona ribeirinha.



Fig. 1. A Casa da Seda do Centro Ciência Viva de Bragança.

Felizmente intacta até hoje, parte da infraestrutura do antigo moinho vide **Fig. 2**: a) hoje um auditório com parte do pavimento em vidro, logo abaixo a galeria que abrigará a nova roda (b) à jusante duma outra intermediária (c), conectadas por um canal interno.



Fig. 2. Galerias da Casa da Seda onde existiu um moinho de água.

Com o crescente interesse nas fontes renováveis de energia, e com desenvolvimento das tecnologias que permitem o seu aproveitamento eficaz, em pequena escala, como é o caso da energia solar fotovoltaica e eólica, os aproveitamentos pico-hídricos, com uma potência até 5 kW [2], ganharam um novo interesse [3–8].

Com efeito, em 2015, o Governo Português publicou o Decreto-Lei N.º 49/2015, que estabelece o regime especial aplicável à adaptação de moinhos, azenhas ou outras infraestruturas hidráulicas equivalentes para produção de energia hidroelétrica, nomeadamente para autoconsumo. Neste contexto, e recuperando a herança histórica da Casa da Seda, este artigo apresenta o projeto de uma roda d'água horizontal e descreve o respetivo sistema pico-hídrico que vai permitir a geração de eletricidade.

Esta unidade pico-hídrica constituirá uma nova fonte de energia para a microrrede [3] que está a ser instalada no contexto do Projeto SilkHouse – desenvolvimento de uma microrrede inteligente baseada em fontes de energia renováveis e um sistema de monitoramento para a Casa da Seda, financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia. A qual atualmente é um pequeno museu de divulgação de ciência e, no final deste projeto, o sistema pico-hídrico baseado na roda de água será interativo.

2 Potencial Hídrico da Roda de Água

As rodas de água variam de tipologia consoante às características do curso de água onde estão aplicadas. As rodas verticais podem ser classificadas quanto à propulsão: superiores (rodas de copos ou de queda) – para caudais reduzidos; médias – caudais intermédios e cotas à meia altura – e; inferiores – cotas mínimas e caudais maiores [9].

As rodas horizontais foram pioneiras nas azenhas pela facilidade de transmissão da potência e pelo baixo custo de construção, podendo trabalhar com caudais pouco elevados [9], como é o caso para o projeto na Casa da Seda.

As rodas de água evoluíram para as atuais turbinas hidráulicas e têm em comum um veio onde são montadas uma série de pás, onde ocorre a transferência de energia [10].

A eficiência deste processo de transferência de potência, um dos parâmetros mais difíceis de quantificar, designadamente para pequenas turbinas, é definida por [10]:

$$eficiência = \frac{potência\ de\ saída}{potência\ de\ entrada} \quad (1)$$

A potência de entrada, ou potência hidráulica (P_h) é dada pela Eq. (2), onde ρ é a densidade do fluido, Q o caudal volúmico, g a aceleração da gravidade e h_t é a cota disponível, que corresponde à diferença de altura entre os pontos de referência [11].

$$P_h = \rho Q g h_t \quad (2)$$

Q, Eq. (3), está relacionado com a velocidade média do fluido (V) que atravessa a seção transversal em cada tubo de descarga, de diâmetro interno D, e é dado por [13]:

$$Q = \pi \frac{D^2}{4} V \quad (3)$$

A equação de Bernoulli, entre quaisquer dois pontos (1 e 2) do percurso de um fluxo incompressível, em regime permanente, e sem perdas por atrito é dada por [13]:

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2} + g h_1 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2} + g h_2 \quad (4)$$

Onde p_i, V_i e h_i são, respetivamente, pressão, velocidade e altura no ponto i, adotando-se a densidade da água $\rho_{H_2O} = 1.000\ kg/m^3$ e a gravidade $g = 9{,}8\ m/s^2$.

Aplicando a Eq. (4) nas condições de teste da roda de água, $V_1 = 0$, $p_1 = p_2 = p_{atm}$ e $h_1 - h_2 = h_t = 3{,}5\ m$ vêm que $V_2 \cong 8{,}3\ m/s$. Na Eq. (3), com $D = 50\ mm$, obtém-se um caudal $Q = 16\ L/s$. Finalmente, da Eq. (2), $P_h = 550\ W$. Logo, considerando uma eficiência global de 50% [10], $P \cong 275\ W$.

3 Caracterização da Roda de Água

O primeiro protótipo da roda de água foi construído em laboratório com o objetivo de obter uma primeira estimativa da eficiência (e da potência) e da velocidade de rotação, para melhor especificar o gerador e o inversor para a ligação à microrrede. Com efeito, a velocidade de rotação é determinante porque condiciona diretamente a tensão do gerador e, consequentemente, a compatibilidade com o inversor [5–8].

O protótipo foi construído à escala real e está apresentado na Fig. 3. Tem em conta os requisitos reais de projeto, como as restrições geométricas impostas pelas instalações da Casa da Seda, designadamente o diâmetro máximo de 1,2 m.

Com o protótipo instalado no laboratório, no Instituto Politécnico de Bragança, a sua estrutura superior de sustentação está assente sobre um tanque. Um eixo na vertical é apoiado nesta estrutura de modo que sua oscilação na horizontal fique limitada e, com a roda livre para girar no interior do tanque. Os jatos de água são posicionados e devidamente direcionados para o ataque às pás. Da superfície da água no reservatório até o ponto de descarga, $h_t = 3{,}5\ m$, correspondente à cota disponível na Casa da Seda.



Fig. 3. a) Conjunto para emulação da cota e; b) protótipo e sua estrutura sobre o tanque.

A tubagem de admissão da água, a partir do dique junto à Casa da Seda (**Fig. 1**), tem um diâmetro interno de 200 mm. Posteriormente, esta deriva-se em 4 tubos com $D = 50\ mm$ cada, formando 4 pontos jatos, entre si, desfasados de 90^o.

4 Resultados e Conclusões

A partir das premissas de projeto, nomeadamente as restrições geométricas impostas pelas instalações da Casa da Seda, foi realizado um esboço definindo um formato preliminar do protótipo e, via software CAD, uma modelação 3D definindo-se as principais dimensões dos elementos estruturais do protótipo (**Fig. 4**).

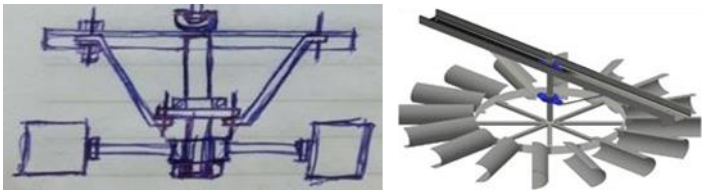


Fig. 4. Esboço e modelação geométrica do protótipo e da sua estrutura.

À roda de água foi acoplado, nesta fase, um gerador eólico de $300\ W$ e baixa rotação ($300\ rpm$), para evitar a necessidade de caixa de velocidades. Serão feitos testes, cujos resultados serão apresentados no artigo final, para ligação à rede elétrica. Entretanto, os testes realizados em bancada, demonstraram a viabilidade de ligação à rede.

Vide secção 2, a potência elétrica mínima, isto é para um único jato de ataque às pás, é de $275\ W$, para uma eficiência global, de 0,5 [10]. Os 4 jatos serão controlados por electroválvulas, via aplicação informática, para permitir interação com os visitantes.

Consequentemente, nas condições atuais, o contributo energético mínimo anual da roda de água para a Casa da Seda é de $1{,}7\ MWh/ano$, considerando que irá operar 70% [3, 4] dos dias do ano, devido a paragens e redução do caudal do rio.

Com a instalação da roda de água pretende-se, também, recuperar o património histórico do antigo moinho, pelo que é necessário considerar as questões estéticas da roda de água final, já que ficará instalada numa galeria sob um auditório (**Fig. 2**) separados por um piso em vidro, sendo visível por parte do visitante.

A influência do número de jatos, sobre o desempenho da roda, será analisada e apresentada no artigo final. Os jatos controláveis pelos visitantes, constituirão um elemento didático relevante na Casa da Seda, a se tratar de um museu de divulgação de ciência. Adicionalmente, a roda de água com os seus 4 jatos, dará um contributo energético importante para a microrrede que está a ser instalada.

O modelo definitivo vai ser construído com a mesma geometria e caracterizada a partir do desenvolvimento do protótipo. Será dada especial atenção ao desenho das novas pás, que serão construídas a partir de novos materiais, basados em compósitos.

A integrar uma microrrede – aproveitando recursos energéticos endógenos e renováveis locais – a roda de água em estudo, a turbina de hélice de baixa queda e o sistema fotovoltaico, farão da Casa da Seda um modelo real de disseminação de tais soluções e de referência para futuras casas eficientes em cidades inteligentes.

5 Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) pelo apoio financeiro concedido no âmbito do Projeto SilkHouse; ao Município de Bragança pelo apoio na implementação física do projeto; ao Centro Ciência Viva de Bragança, designadamente à Ivone Fachada e Estefânia Gonçalves pela colaboração nas atividade realizadas; à ESTiG-IPB pela concessão dos materiais e laboratórios; pelo apoio nas atividades realizadas, José Batista, Wellington Maidana da Silva, Vitor Gomes, Jorge Paulo e Abílio Marcelo; à Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) pela oportunidade do intercâmbio no âmbito da dupla diplomação com o IPB.

Referências

1. Macintyre, A.J.: Maquinas motrizes hidraulicas. Guanabara Dois, Rio de Janeiro (1983)
2. Paish, O.: Small hydro power: technology and current status. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 6, 537–556 (2002). doi:https://doi.org/10.1016/S1364-0321(02)00006-0
3. da Silva, W.M., Leite, V., Ferreira, Â., Queijo, L., Batista, J., Bonaldo, J., Gonçanves, E.: Design of a self-sustainable system based on renewable energy sources for a small museum of science dissemination: the House of Silk. Em: CIEEMAT 17. pp. 155–160. IPB, Bragança, Portugal (2017)
4. Leite, V., Figueiredo, T., Pinheiro, T., Ferreira, Â., Batista, J.: Dealing with the very small: first steps of a picohydro demonstration project in an university campus. Em: ICREPQ 2012. , Santiago de Compostela, Spain (2012)
5. Leite, V., Ferreira, Â., Couto, J., Batista, J.: Compatibility analysis of grid-connected pico-hydro systems using conven-tional photovoltaic inverters. Em: EPE 2016. , Karlsruhe, Germany (2016)
6. Leite, V., Ferreira, Â., Couto, J., Batista, J.: Pico-hydro systems: microgrid-connection approaches. Em: MIGEDIR 2016. , Concepción, Chile (2016)
7. Leite, V., Ferreira, Â., Couto, J., Batista, J.: Grid-connection approaches for pico-hydro systems. Em: CIEEMAT 2016. CEFET/RJ, Angra dos Reis, Brasil (2016)
8. Leite, V., Ferreira, Â., Couto, J., Batista, J.: A pratical approach for grid-connected pico-hydro systems using conventional photovoltaic inverters. Em: IEEE ENERGYCON 2016. IEEE, Leuven, Belgium (2016)
9. Viollet, P.-L.: Water engineering in ancient civilizations: 5,000 years of history. International Association of Hydraulic Engineering and Research, Madrid (2007)
10. Harvey, A.: Micro-hydro design manual: a guide to small-scale water power schemes. IT Publications, London (1993)
11. Fox, R.W., McDonald, A.T., Pritchard, P.J., Mitchell, J.W.: Fox and McDonald's introduction to fluid mechanics. Wiley, Hoboken (2015)

Analysis of the energy saving potential for heating of double skin glass-glass facades

Víctor Diez-Martínez[1] Dr. Roberto-Getino-de-la-Mano[1] Dr. José Luis Falagán-Cavero[2] Dr. David Borge-Diez[2]

[1] Regional Energy Agency of Castilla y León, Reyes Leoneses 11, 24008 León, Spain
[2] University of León, Campus de Vegazana, 24071 León, Spain
diemarvi@jcyl.es getmanro@jcyl.es jlfalc@unileon.es
david.borge@unileon.es

Summary. The energy flows produced in the double skin, glass-glass facades have been analysed, establishing a mathematical model with which the energy saving potential of this constructive solution has been determined in 10 cities of Spain with different climatology. The two climatological variables that most influence are the outside temperature, being directly related to the heating demand, and the solar irradiation, being the source of energy from which the savings are extracted. The useful energy for heating provided by the double-skin façade is greater in cities that have a lower average annual temperature. The pure southern orientation is not the one that produces the greatest energy savings in general. In this sense, taking into account the orientation of the façade, the maximum values of energy saving depend on the climatology and are deviated a few degrees towards the east with respect to the south orientation. The azimuth with which the maximum energy saving is obtained, deviates more to the east the higher the average annual temperature. The lower the relation between the double skin facade surface and the heated surface of the building, the energy saving in heating is greater, although it does not present a linear proportionality.

Keywords: Double skin facade, almost zero consumption, solar energy, air conditioning, bioclimatic, passive uptake

1 Introduction

The construction sector represents 26.1% of the final national energy consumption for energy uses, in accordance with the Energy Saving and Efficiency Action Plan in Spain 2011-2020 [1]. It is for this reason a strategic sector for which they provide important public and private resources, as there is still a high potential for energy savings. The same Plan, establishes a goal of final energy saving in the year 2020 of 2,867 ktoe / a year in the Building and equipment sector, which represents 16.1% of the total savings planned for that year.

The real estate park is currently responsible for 36% of all CO_2 emissions from the European Union. The Union has committed to establishing a system of decarbonised energy in the year 2050, for which there are various standards aimed at improving the

energy efficiency of the building park, such as Directive 2010/31 / EU [2], on the energy performance of buildings, Directive 2012/27 / EU [3] on energy efficiency or the Directive 2018/844 [4] which modifies the previous ones. Likewise, the Paris Agreement of 2015 boosts efforts to decarbonize the real estate park.

Consideration 17 of Directive 2010/31 / EU, states that "measures are needed that increase the number of buildings that not only meet the minimum requirements of energy efficiency currently in place, but also be more energy efficient by reducing both the energy consumption and the dioxide emissions of carbon". In Article 9 of the same, it is established that the Member States will ensure that before 12/31/2020 all new buildings are almost zero energy consumer buildings, and that after 12/31/2018, new buildings that are occupied and owned by public authorities are buildings of almost zero energy consumption. In addition to the above, Article 5 of Directive 2012/27 / EU establishes the exemplary function of the buildings of public organisms obliging the member states to renew annually 3% of the surface of the buildings that occupies the Central Administration.

Because of previously cited directives, it is considered to be topical and of great relevance the technical knowledge detailing the possibilities of saving energy and also the incorporation of renewable energies in buildings.

This research focuses on the analysis of the operation of the double-skin facades, glass-glass, used to harness solar energy for heating buildings. The south-facing glazed facades (in the northern hemisphere) are a constructive solution that has been historically employed in buildings, through the incorporation of glazed balconies or attached greenhouses for the use of solar radiation for air conditioning in winter.

This research has analysed the energy savings produced by formulation mathematics, computer calculations being automated to be able to apply the mathematical model hour by hour throughout the year. At a later stage, they check the results from measurements in a real building, for which they have already installed probes to obtain data during the heating season 2018- 2019.

As a starting point, a search of related publications has been carried out with the use of solar energy through glass chambers. The biggest part of the studies carried out to date, have been based on computer simulations and / or mathematical methods, having noted only a few based on experiments or monitoring of real buildings.

Pomponi et al [5] in 2016 published a meta-analysis of the publications related to the energy efficiency of double-skin facades. In said document, after analysing data from 27 publications, an average potential reduction is determined from the heating load of 33%. One of the conclusions of this study, is the dispersion of the energy saving produced, which varies from 90% of savings to an increase in consumption of 30%. This is motivated, according to the same report, by the variability of constructive solutions, the ventilation method of the chamber, the zone climate and the methodology with which the study is carried out. In this regard the study highlights the great difference that exists in the amount of energy saving determined by mathematical methods, up to 90%, simulation, up to 53% and experimental as Only 30%.

On the other hand, in view of the high energy saving potential of this constructive solution which has been determined in previous investigations, it is expected to be a

measure of great relevance to achieve the objectives of almost zero consumption buildings established by the European Directives.

2 Mathematical procedure

The procedure summarized below is based on the determination of the energy flows that occur in the double skin façade, in order to quantify what part of the incident solar energy can be used for heating the building. By taking advantage of this energy flow the heating system will have a lower producing consumption, therefore an energy saving. A predictable increase has not been determined in energy consumption for cooling that the same double-skin facade would produce in the summer season, since there are multiple solutions with different efficiencies to produce shade on the facade and thus reduce these hot gains.

Figure 1 shows the basic scheme of the double skin facade to consider, also indicating the main energy flows.

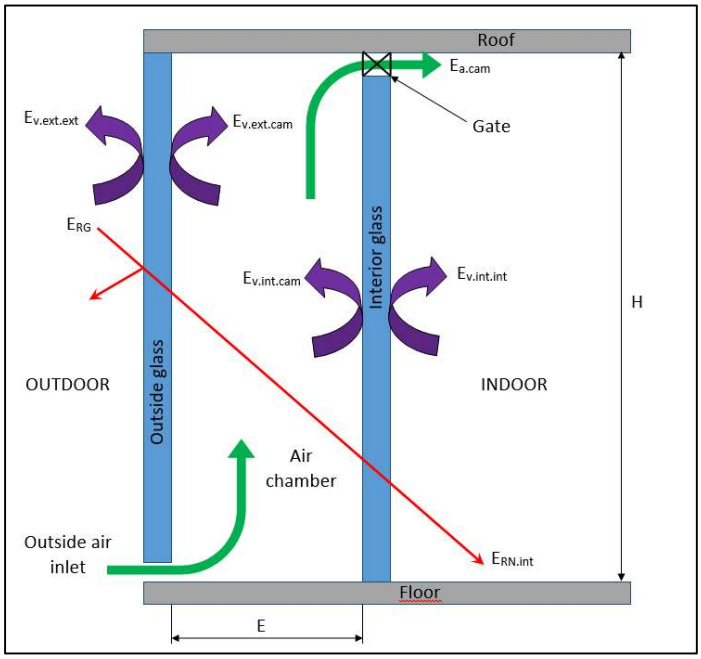


Figure 1. Basic schema and energy flows considered.

The circulation of air inside the chamber that is generated between the two glasses, is carried out by natural convection, without any type of mechanical ventilation system. The entrance of air from the chamber to the interior of the building, has an automatic gate that only opens during the period of heating, and provided that the average temperature of the air in the chamber exceeds the interior temperature of the building by a number of preset degrees.

The energy saving for heating is determined by comparing the energy demand of a building of conventional construction, with which it would have the same building if a double skin facade is incorporated in one of its enclosures. In order to obtain a valid procedure for the largest number of cases, it will be taken into account buildings with different energy demands for heating, and will be considered facades with any angle of inclination and azimuth with respect to the south.

2.1 Study of solar radiation

As starting data, there is both direct solar irradiance and diffused irradiation on a horizontal surface. First of all it has been determined, from these, the global irradiance received by the exterior glass, which is found with a certain inclination (β) and azimuth (α). Direct solar irradiation on the exterior glass ($P_{RVDirect}$) is obtained with the following expression:

$$P_{RVDirect} = P_{RHDirect} \times k \quad (1)$$

In which:

- $P_{RHDirect}$ = Direct solar irradiation on a horizontal surface (W/m²)
- k is a factor that is determined as:

$$k = \frac{sen(\delta)sen(\vartheta)\cos(\beta) - sen(\delta)\cos(\vartheta)sen(\beta)\cos(\alpha) + \cos(\delta)\cos(\vartheta)\cos(\beta)\cos(\omega)}{sen(\delta)sen(\vartheta) + \cos(\delta)sos(\vartheta)\cos(\omega)} +$$

$$+ \frac{cos(\delta)sen(\vartheta)\,\mathrm{sen}(\beta)\cos(\alpha)\cos(\omega) + cos(\delta)\cos(\vartheta)sen(\beta)\,\mathrm{sen}(\alpha)\,\mathrm{sen}(\omega)}{sen(\delta)sen(\vartheta) + \mathrm{co}\ (\delta)sos(\vartheta)\cos(\omega)} \quad (2)$$

In which:

- ϑ = Latitude (rad)
- α = angle of orientation from the normal to the façade, taking as its origin the south orientation and considering negative angles towards the east and positive towards the west. (rad)
- β = slope of the facade (rad)
- ω = schedule angle (rad)
- δ = solar decline (rad). It can be determined for each hour of the year with the following expression:

$$\delta = 0{,}006918 - 0{,}399912 \times \cos(x) + 0{,}070257 \times \mathrm{sen}(X) - 0{,}006758 \times \cos(2x) +$$

$$+0{,}000907 \times \mathrm{sen}(2x) - 0{,}002697 \times \cos(3x) + 0{,}001480 \times \mathrm{sen}(3x) \quad (3)$$

In which:

$$x = \frac{2\times\pi}{365}\left(N\text{-}1 + \frac{h\text{-}12}{24}\right) \quad (4)$$

Where N and h are the number of day of the year and time of day respectively.

The diffused solar irradiance on the exterior glass ($P_{RVDiffuse}$) is obtained with the following expression:

$$P_{RVDiffuse} = \frac{1}{2} P_{RHDiffuse} \times (1 + \cos(\beta)) \quad (5)$$

The solar radiation reflected on the exterior glass ($P_{RVReflected}$) is obtained with the following expression:

$$P_{RVReflected} = \frac{1}{2} \times \rho \times (P_{RHDirect} + P_{RHDiffuse}) \times (1 - \cos(\beta)) \quad (6)$$

The global irradiance on the outer glass (R_{VG}) is the sum of the direct solar irradiance, the diffuse and the reflected one

$$P_{RG} \quad P_{RVDirect} + P_{RVDiffuse} + P_{RVReflected} \quad (7)$$

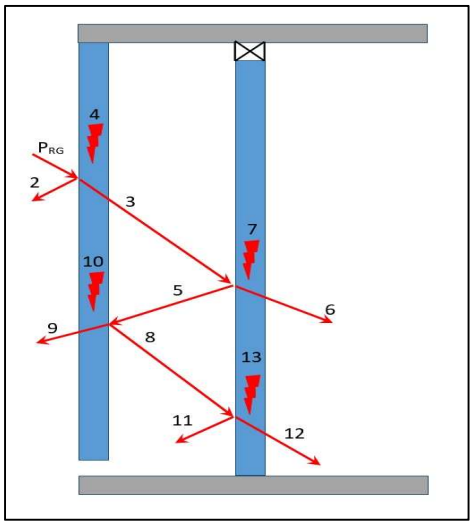


Figure 2. Decomposition of the global radiation that affects the outer glass.

Known as absorptivity, transmissivity and reflectance of the two glass panels, one can determine each of the energy flows listed in Figure 2. By grouping the energy flows and multiplying the glass surface, one can obtain the solar net that reaches the interior, the solar irradiance absorbed by each of the glasses and the irradiance reflected to the outside.

2.2 Transmission of heat on the surface of the glasses

At times when the glass is at a different temperature than that of the environment that surrounds them, they will exchange heat by convection and radiation. The heat that is exchanged with the air is transmitted mainly by convection and with the rest of the elements it is done by radiation.

It has not been evaluated the radiation emitted on each side that has contact with the chamber, both the exterior and interior, assuming that both are at a very close temperature, and therefore, the heat transmitted by radiation between both is very low.

2.3 Determination of energy savings

The energy saving for heating is produced by the introduction into the building of three energy flows:

- Net solar radiation energy that reaches the interior.
- Energy transmitted by convection and radiation from the interior glass to the interior.
- Energy transmitted in the form of hot air from the air chamber.

Not all available energy in these flows can be considered useful or usable energy for the heating system. So that these flows are considered useful energy, these conditions must be met:

- That there is a demand for heating, that is, that the outside temperature is lower than a certain pre-established value.
- That the instantaneous heat provided by the double-skin façade is the same or lower than the heating demand in that moment. In the event that the heat provided by the double-skin facade is superior to the demand, it is considered as useful energy for an appropriate time.

The sum of the useful energy flows during a year will be the energy saved annually. The energy saving in percentage will be:

$$\text{Energy savings} = \frac{\text{Unenergy provided by the double skin facade}}{\text{Demand for heating without the double skin facade}} \times 100 \quad (8)$$

The procedure used to calculate the heating demand of the building without the double skin-facade, is explained in the following section.

3 Automation of calculations

The procedure described in the previous section has been programmed in an Excel spreadsheet to be able to perform calculations automatically, for each hour of the year, and being able on the one hand to easily assess energy savings, and on the other, assess how it affects the same the modification of the starting data.

The main starting data are:

- The hourly data of external dry temperature

- Specific humidity of the air
- Direct solar irradiance on horizontal surface
- Diffused solar irradiance on horizontal surface

This data has been taken from the climate files, published as documents known to be used in the energy certification of buildings, by the Ministry for the Ecological Transition of the Government of Spain [6]. On the website of this Ministry, it is available for free the data from the provisional capitals of Spain.

In order to evaluate the influence of climatology on energy saving, we have selected 10 cities in Spain with decreasing latitudes. In addition, these cities are representative of different climates that occur in the country. In Table 1 it shows the chosen cities and their latitude, longitude and altitude. In the same table the climatic zone corresponding to each city is included, in accordance with the Code Building Technician (CTE) [7], and the referred heating demand considered for each city as established in Annex III.2 from the recognized document for the energy certification of buildings "Qualification of the energy efficiency of the buildings "[8]. The rest of the starting data are shown in Table 2.

Table 1. Selected cities.

City	Latitude (º)	Length (º)	Altitude (m)	Climate zone CTE	Reference demand (kWh/m²year)	T Max (º)	T Min (º)	Tª Avg (º)	Average solar irradiation (W/m²)
Oviedo	43.5	-5.8	339	D1	178.3	27.9	0.7	12.6	65.79
León	42.9	-5.6	913	E1	232.1	33.6	-4.8	10.7	86.57
Zamora	41.0	-5.9	667	D2	178.3	36.0	-4.2	12.5	91.15
Salamanca	40.5	-5.4	790	D2	178.3	34.5	-3.8	11.6	92.71
Madrid	40.1	-3.6	667	D3	178.3	36.0	-0.6	14.3	89.06
Cáceres	39.7	-6.3	405	C4	125.6	38.8	-1.4	16.2	95.14
Badajoz	38.8	-6.8	192	C4	125.6	38.8	0.2	16.4	98.60
Córdoba	37.4	-4.8	92	B4	83.5	42.0	-0.5	17.4	98.88
Sevilla	37.7	-6.0	31	B4	83.5	41.1	2.0	18.2	102.0
Cádiz	36.0	-6.2	4	A3	62.5	31.8	6.3	18.2	103.8

To establish the total heated area of the building, the heated surface ratio is used between an available double-skin facade surface (RT_1). Multiplying the available double-skin facade surface by this index, you get the total heated surface of the building. By varying this relationship, you can estimate the energy saving in buildings with different geometric configurations.

The hourly heating demands of the building without the double-skin façade, have proportionally determined the thermal jump between inside and outside, from the annual heating consumption, which is obtained through the consumption ratio of final energy for heating (RT_2) in kWh/m² a year. This ratio is often used in the energy certification of buildings, so it will be easy to have it in buildings that have this certificate.

Table 2. Other starting data.

Variable	Symbol	Value	Units
Azimuth of the facade with respect to the south	α	0	º
Inclination of the facade	β	90	º
Height of the air chamber	H	23	m
Length of the air chamber	L	44	m
Thickness of the air chamber	E	1.1	m
External glass absorptivity	a_{ext}	0.08	
External glass reflectance	r_{ext}	0.16	
External glass reflectance	t_{ext}	0.76	
Emissivity of the exterior surface of the exterior glass	$\varepsilon_{v.ext.ext}$	0.94	
Emissivity of the surface to the outer glass chamber	$\varepsilon_{v.ext.cam}$	0.94	
Thermal conductivity of exterior glass	K_{ext}	0.8	W/mºK
Thickness of outside glass	ε_{ext}	0.025	m
Density of exterior glass	φ_{ext}	2,500	kg/m^3
Specific heat of the exterior glass	$C_{P.ext}$	0.8	kJ/kgºK
Interior glass absorptivity	a_{int}	0.08	
Interior glass reflectance	r_{int}	0.16	
Interior glass transmissivity	t_{int}	0.76	
Emissivity of the inner surface of the inner glass	$\varepsilon_{v.int.int}$	0.94	
Emissivity of the surface to the interior glass chamber	$\varepsilon_{v.int.cam}$	0.94	
Thermal conductivity of interior glass	K_{int}	0.8	W/mºK
Thickness of the inner glass	e_{int}	0.025	m
Density of the interior glass	φ_{int}	2,500	kg/m3
Specific heat of the interior glass	$C_{P.int}$	0.8	kJ/kgºK
Dry air temperature inside the building	$T_{a.int}$	22	ºC
Terrestrial albedo	ρ	0.2	
Temperature increase for gate opening		5	ºC
Temperature limit for heating demand		15	ºC
Relationship between heated surface / double skin facade surface	RT_1	10	
Ratio of final energy consumption for heating	RT_2	Variable depending on the selected city	

4 Research and results

Based on the procedure established and using the described simulator as a tool, tests have been carried out to determine the influence on variations of energy saving from each of the starting data. After multiple tests with this model, it has been concluded that the variables that have the greatest influence on the magnitude of savings are:

- Location-climatology. Directly related to the latitude and altitude of the building's location.
- Azimuth of the facade with respect to the south orientation
- Relation surface of double skin facade / heated surface (RT_1)
- Reflectance of the glasses

4.1 Location-climatology

The climatology is one of the factors that has a greater influence on the amount of energy saving for heating. Specifically, the two climatological variables that most influence are the outside temperature, as it is directly related to the heating demand, and the solar irradiation, since it is the source of energy from which the savings are extracted.

As explained above, the influence of location and climate on energy saving has been assessed through geographic and climatic data from 10 cities in Spain. Figure 3 shows the evolution of the useful energy produced by the double-skin facade and in Figure 4 the evolution of energy saving.

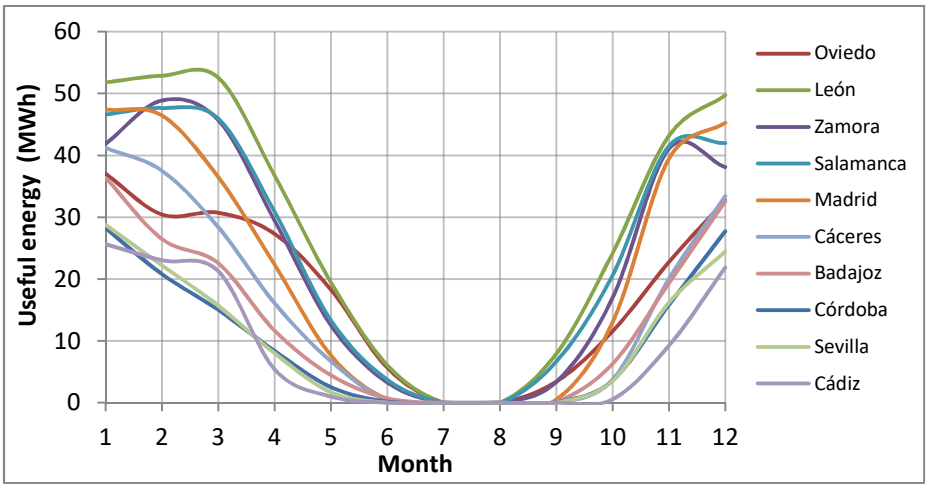


Figure 3. Evolution of monthly useful energy.

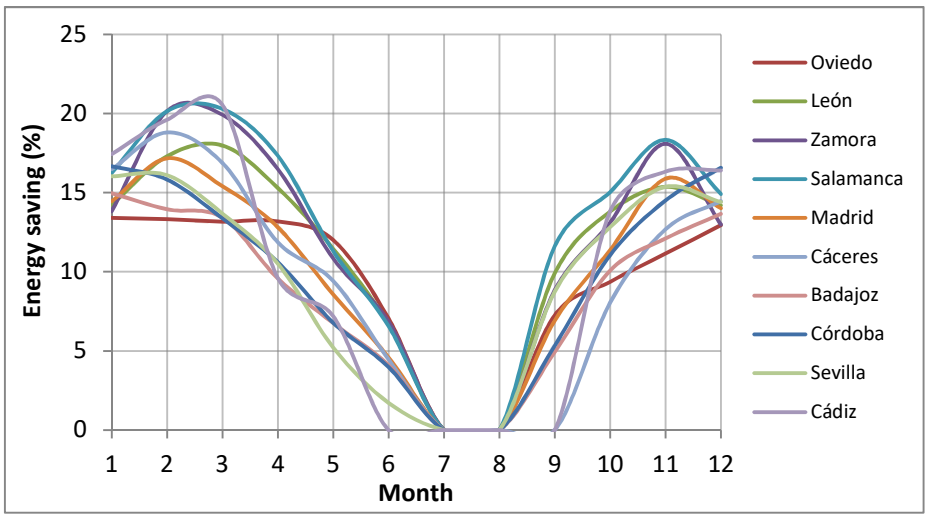


Figure 4. Evolution of energy saving.

In absolute terms, the annual useful energy provided by the double-skin façade is greater in cities with a lower average outdoor temperature. Specifically, of the cities analysed, León has the highest useful energy and Cádiz the lowest. Both cities correspond to the lowest and highest annual average temperature respectively. For the case presented, the annual useful energy can be obtained from the annual average temperature by means of the equation of a line, with a correlation of 92% (see Figure 5).

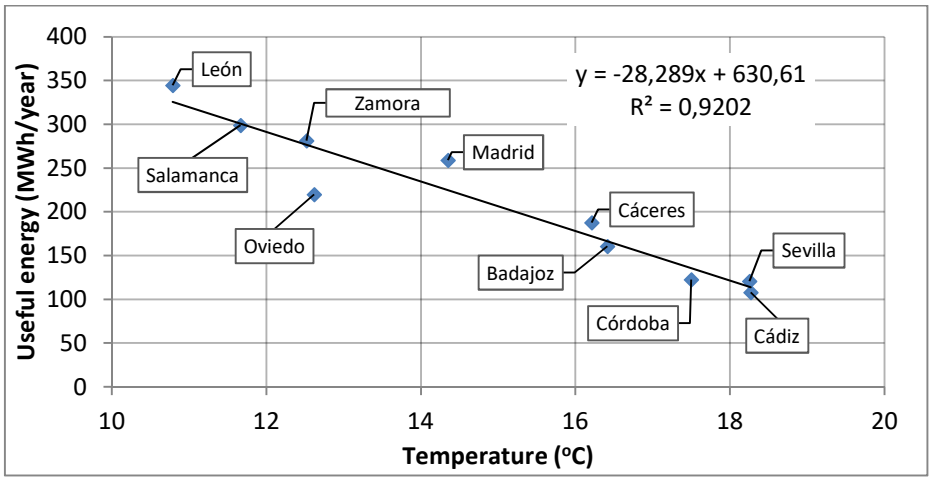


Figure 5. Relationship between the annual average temperature and the useful energy contributed.

The percentage of energy saved is extremely variable and there has not been identified any variable on which it depends predominantly. If it has been detected that it increases when the average solar radiation increases, the correlation is low (30%). This fact justifies the need for a procedure with certain complexity for its determination as presented in this communication.

Since climatology is a determining factor for energy saving, the analysis carried out in the following sections for the rest of the variables is carried out individually for each of the 10 cities.

4.2 Azimuth of the façade with respect to the south orientation

For each of the 10 cities, the useful energy produced and the energy saving for different azimuths of the double skin façade have been determined. Figure 6 shows the variation of energy savings with different azimuths.

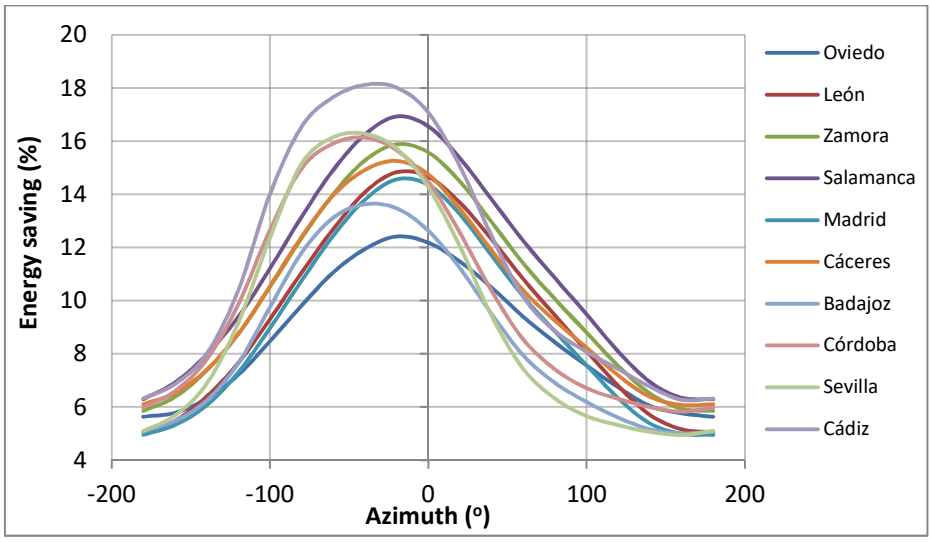


Figure 6. Energy saving by city with different azimuth.

With the analysis of these data, it is deduced that there is a very high relation between the energy saving and the azimuth of the façade. On the other hand, contrary to what one might think at first sight, the pure southern orientation is not the one that produces the greatest energy savings in general. As can be seen in Figure 6, the maximum saving values depend on the city (climatology), and are deviated a few degrees towards the east with respect to the pure south orientation. The azimuth with which the maximum saving is obtained, deviates more to the east, the higher the annual average temperature. This is due to the fact that the solar contribution is more usable for heating in the morning than in the afternoon, because the building has a greater demand for heating in the morning than in the afternoon, the reason for this being the thermal jump between the inside and outside in the mornings.

4.3 Relationship between double skin facade surface and heated surface

The smaller the relation between the double skin facade surface and the heated surface of the building, that is, the smaller RT_1, the energy saving in heating is greater, although it does not present a direct proportionality as can be seen below .

As shown in Figure 7, to obtain savings of percentages higher than 20%, RT_1 must be less than 7 if you want to make sure, in any of the cities studied. With RT_1 values higher than 14, the energy saving is, in all cities, less than 15%, so the contribution of the double-skin façade may start to be of little relevance from an economic point of view.

In Figure 8 it can be seen that in cities with colder climates, the useful energy increases rapidly with increasing RT_1 until it reaches a value equal to 4. From this point

the useful energy continues to increase but with a lower slope. In cities with warmer climates, the curve of increase in useful energy has a more flattened shape.

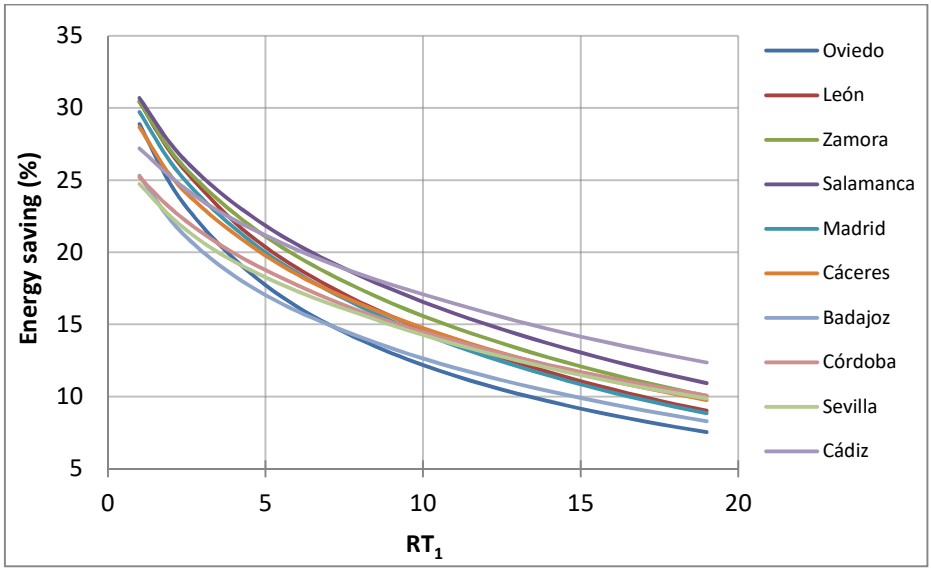


Figure 7. Energy saving by city based on RT_1

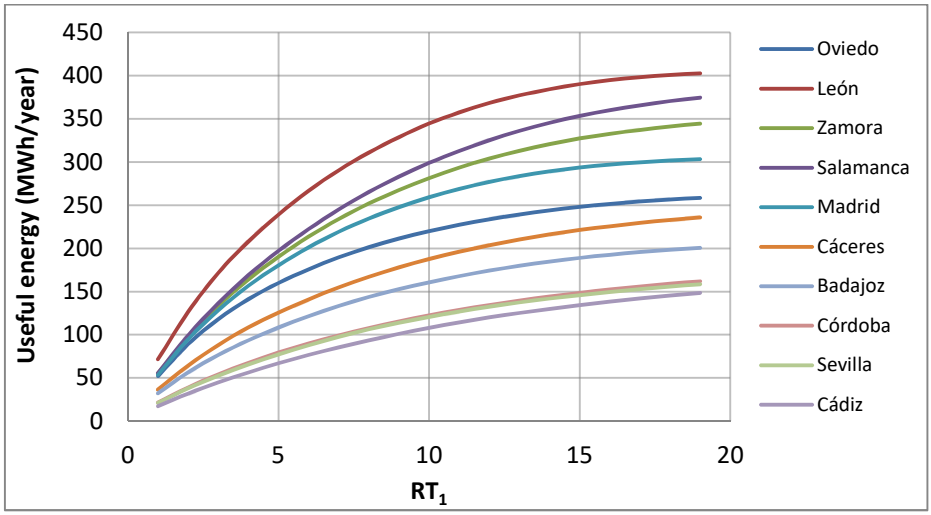


Figure 8. Useful energy by city according to RT_1

4.4 Reflectance of the glasses

This variable also has a great influence on the energy saving of double-skin facades, since the greater the amount of solar radiation reflected, the less solar energy is available to be introduced into the building. As can be seen in Figure 9, energy savings decrease with increasing reflectance. The decrease is linear and the slope of the straight line is practically the same in all cities, so we can deduce that it is independent of the weather.

The reflectance of the glass should be taken into account in the design of double skin facades, since, as can be seen in the figure of Figure 9, with reflectance above 30% the energy saving is less than 15% in all cases, so the contribution of the double-skin facade can start to be of little relevance from an economic point of view.

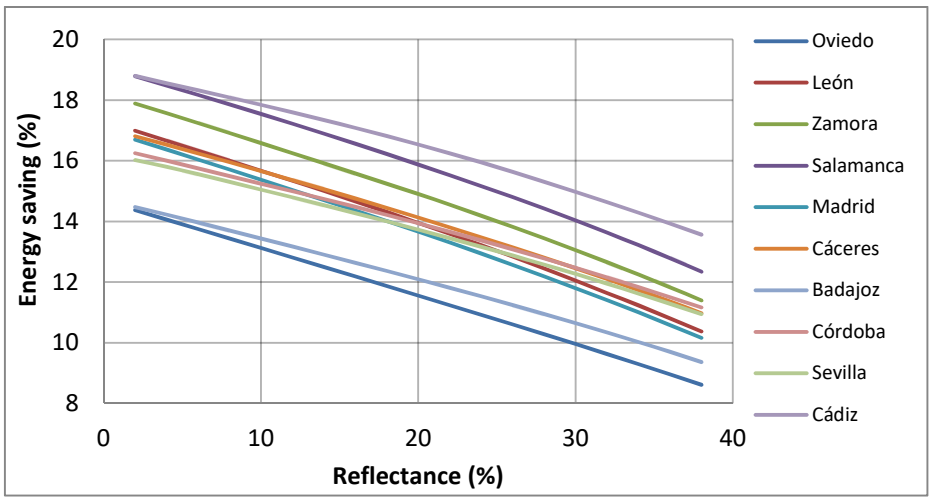


Figure 9. Energy saving by city based on the reflectance of the glasses

4.5 Future works

In the winter season of 2018-2019, it is the intention to validate the procedure described above, by measuring the energy savings generated in the headquarters of the Regional Energy Agency of Castilla y León, located in the city of León, and which provides of a double-skin glass-glass facade with a configuration similar to that presented and a glazed surface in the south orientation of 1,032 m^2. In this building, probes have already been installed for the measurement of temperature and relative humidity outside, interior temperature of the chamber at different altitudes, incidental solar radiation on the façade, ventilation airflow of the chamber, etc, as well as a switchboard that will allow the continuous recording of the variables measured by the probes.

5 Conclusions

The evaluation of the energy saving produced by the double-skin facades is a complex task that depends on numerous factors. The percentage of energy saved is extremely variable and depends mainly on the location and weather, the azimuth of the facade with respect to the south orientation, the relationship between the surface of the double-skin facade and the heated surface and the reflectance of the glass. This justifies the need for a procedure with a certain complexity for its determination.

Not all the energy that can produce this constructive solution is usable for heating. Even only considering the energy produced by the double-skin facade in the periods which there is a demand for heating, there are intervals of time in which the production of heat exceeds the heating demand, so with the studied configuration of double-skin facades, you can take advantage of all the energy produced. This fact indicates that the percentages of energy savings could be improved if the system is provided with elements capable of storing energy at times when production exceeds demand, and relinquishing it when there is a production deficit. This opens a new line of research.

In absolute terms, the anual useful energy provided by the double-skin facade is greater in cities that have a lower average annual outdoor temperature. For the 10 cities studied, a very high correlation has been found between the average annual temperature and the energy saving provided, responding to this relationship to the equation of a line.

The pure southern orientation is not the one that produces the greatest energy savings in general. The optimal orientation depends on the climatology, and is deviated a few degrees to the east with a pure south orientation. This is because the solar contribution is more usable in the mornings than in the afternoon, since the building presents greater demand for heating in the morning, as the thermal jump between the interior and the exterior is greater. The optimum azimuth deviates further east the higher the average annual outdoor temperature.

In order to obtain percentages of savings of more the 20% in climatologies similar to those studied, the relationship between the double skin facade surface and the total heated suface of the building (RT_1) must be less than 7. The useful energy proportioned by the double skin facade increases rapidly with increasing RT_1 until it reaches a value equal to 4. From this point the useful energy continues to increase but with a lower slope. In cities with a higher annual temperature, the useful energy increase curve has a more flattened shape.

Finally, the reflectance of the glass should be taken into account in the design of double-skin facades, since with reflectance higher than 30%, the energy saving is less than 15% in any climatology similar to those studied. In this case, the contribution of the double skin facade may be of little relevance from an economic point of view.

6 References

1. Action Plan for Saving and Energy Efficiency 2011-2020. Approved by Cabinet of Ministers Agreement of July 29, 2011.

2. DIRECTIVE 2010/31/UE OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 19 of May of 2010 on the energy performance of buildings.
3. DIRECTIVE 2012/27/EU OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 25 October 2012 on energy efficiency, amending Directives 2009/125/EC and 2010/30/EU, and repealing the Directives 2004/8/EC and 2006/32/EC .
4. DIRECTIVE (EU) 2018/844 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 30 May 2018 amending Directive 2010/31/EU on the energy performance of buildings and the Directive 2012/27/EU relative to energy efficiency.
5. Pomponi, F., Piroozfar, PAE, Southall, R., Ashton, P., Farr, ERP, Energy performance of Double-Skin Façades in temperate climates: A systematic review and meta-analysis (2016) Renewable and Sustainable Energy Reviews, 54, pp. 1525-1536. DOI: 10.1016 / j.rser.2015.10.075
6. Website of the Ministry for the Ecological Transition of the Government of Spain. Section of recognized documents for the energetic certification of buildings. http://www.mincotur.gob.es/energia/desarrollo/EficienciaEnergetica/CertificacionEnergetica/DocumentosReconocidos/Paginas/documentosreconocidos.aspx
7. Technical Building Code. https://www.codigotecnico.org/
8. Recognized document: Qualification of the energy efficiency of buildings. Version 1.1 of November 2015. http://www.mincotur.gob.es/energia/desarrollo/EficienciaEnergetica/CertificacionEnergetica/DocumentosReconocidos/normativamodelosutilizacion/20151123-Calificacion-eficiencia-energetica-edificios.pdf

Movilidad sostenible: vehículos eléctricos con energía renovable para una ciudad intermedia latinoamericana

L. G. González[1][0000-0001-9992-3494], J. L. Espinoza[1][0000-0002-7450-2084], J. Avilés[2]

[1] Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones – DEET
[2] Departamento de Ingeniería Civil
Universidad de Cuenca, Cuenca - Ecuador CP. 010103
*juan.espinoza@ucuenca.edu.ec

Resumen. El presente artículo presenta un análisis sobre la factibilidad de sustitución de vehículos a combustión interna por vehículos eléctricos alimentados a partir de energías renovables, dentro de un enfoque de sostenibilidad urbana en una ciudad intermedia latinoamericana. Para ello, se hace una estimación del consumo energético por uso de combustibles en el sector transporte en la ciudad de Cuenca, Ecuador. En el estudio se analiza la composición del parque automotor de la ciudad, mayoritariamente a gasolina, determinándose que cerca del 56 % (80800) pertenece al segmento con cilindraje inferior a 2000 cc, con recorridos promedio de 36 km diarios. Bajo el escenario de una sustitución total de este segmento de vehículos convencionales por vehículos eléctricos, estos últimos demandarían un consumo energético cercano a 480 MWh/día, comparado con los casi 300.000 litros/día de gasolina que se usan actualmente. La energía que demandaría el nuevo parque automotor eléctrico puede ser aportada por un conjunto de plantas solares fotovoltaicas, ubicadas en la zona de estudio, con capacidad de 112.32 MW en una extensión cercana a 73.24 Ha, área que representa el 0.02 % del territorio cantonal. En términos económicos, la instalación de la infraestructura energética necesaria podría representar 3.54 veces el gasto anual en combustible consumido actualmente por el segmento vehicular en estudio. El estudio plantea además que con una generación de energía solar fotovoltaica equivalente al 10% de la capacidad total instalada en la ciudad, se podría contar con un parque de vehículos eléctricos del 20% y 67% en los segmentos privado y de alquiler, respectivamente El trabajo pretende demostrar que es posible aumentar la eficiencia del actual modo de transporte en Cuenca, recurriendo al uso progresivo de vehículos eléctricos que pueden ser alimentados desde fuentes renovables de energía.

Palabras Claves: Energía solar, Eficiencia, Vehículo Eléctrico, Recorrido Diario, Ciudad Intermedia Latinoamericana.

1 Introducción

En los últimos años, se han desarrollado diversos estudios para determinar el nivel de sostenibilidad de las principales ciudades del mundo, generando indicadores que cubran aspectos económicos, sociales y ambientales [1, 2]. En lo ambiental, si bien se ha dado

atención a la movilidad y la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, causantes del cambio climático, no se reconoce o explora a fondo la importancia que tienen la forma urbana y su relación con los medios de transporte utilizados. El concepto de ciudad compacta, se ha convertido paulatinamente en el paradigma fundamental para alcanzar la sostenibilidad de las ciudades [3]. Este concepto de densificación urbana se relaciona directamente con la reducción tanto del uso del vehículo privado como del consumo de energía por el uso de combustibles fósiles, lo cual genera beneficios sociales, ambientales y económicos en las ciudades [4, 5]. Sin embargo, un grupo importante ciudades ubicadas en países en desarrollo, dentro de las cuales se incluyen ciudades latinoamericanas, presentan procesos de dispersión fruto de su propio crecimiento desconectado de los centros urbanos, lo cual se evidencia por sus bajas densidades y un alto índice de uso del vehículo privado per cápita. Este fenómeno implica un elevado consumo de energía fósil y contaminación ambiental que va en desmedro de la sostenibilidad de dichas ciudades.

Es fundamental entonces empezar a reflexionar, desde lo local, la relación sistémica entre forma urbana, medios de transporte, innovación tecnológica, energías alternativas y desarrollo socio-económico en las ciudades y así aportar a la generación de políticas públicas que promuevan, a mediano y largo plazos, la construcción de ciudades más sostenibles. No obstante, se debería actuar también en el corto plazo. El proyecto "Más allá del petróleo: un estudio de la relación entre la forma urbana y el transporte en dos ciudades del Ecuador" propone entre sus objetivos explorar la posibilidad de satisfacer la demanda de transporte en Quito y Cuenca a través de vehículos eléctricos alimentados por fuentes de energía renovable ubicadas dentro de los límites urbanos. Este objetivo se inserta dentro de la propuesta general del proyecto de construir ciudades resilientes, donde a través de su propia planificación pueden llegar a lograr cierto grado de autosuficiencia energética y, consecuentemente, entrar en un proceso de sostenibilidad urbana.

El presente artículo presenta una estimación del consumo energético por uso de combustibles en el sector transporte en Cuenca, Ecuador, cuyas características son propias de una ciudad intermedia latinoamericana. La determinación del consumo energético fósil permite proyectar su sustitución por energía renovable dentro de un enfoque de sostenibilidad urbana. Con ello se pretende demostrar que es posible aumentar la eficiencia del actual modo de transporte en Cuenca, recurriendo al uso de vehículos eléctricos que pueden ser alimentados desde fuentes renovables de energía.

El estudio se ha dividido en las siguientes secciones: la sección 2, estudia los aspectos que pueden propiciar la transición hacia el uso de los vehículos eléctricos como medio de transporte sostenible. La sección 3 describe la composición del parque automotor de una ciudad intermedia latinoamericana, caso de estudio ciudad de Cuenca, mientras que la sección 4 analiza la eficiencia y autonomía de los vehículos eléctricos en este tipo de ciudades. En la sección 5 se realiza la estimación de consumo energético del parque automotor de Cuenca en el segmento de los vehículos livianos, y su alimen-

tación a partir de fuentes renovables. En la sección 6 se estudia la red eléctrica disponible y efectos de la progresiva penetración de los vehículos eléctricos. Finalmente, en la sección 7 se presentan las conclusiones del estudio.

2 Oportunidades para la electrificación del transporte

Dado que la energía destinada a la generación de electricidad y el transporte representaron el 60% del total consumido en el mundo en 2013, las fuentes de energía renovable para la generación de electricidad y la electrificación del transporte proporcionan un gran potencial para reducir el uso de combustibles fósiles [6], considerando la dependencia mundial en estos combustibles. Por otro lado, teniendo en cuenta que el 36% de la población mundial urbana habita dentro de las ciudades intermedias y que para el 2030 sería del 50% con una firme tendencia a incrementar su desarrollo urbano [7], es necesario abordar planes para la sostenibilidad de dichas urbes. En vista de estos escenarios y dado que el transporte es vital para soportar una rápida dinámica de desarrollo económico y social para América Latina es importante abordar políticas que permitan la evolución de la región, y especialmente a las ciudades intermedias con tasa de crecimiento superior a la media, dado que los patrones actuales y tendencias no son sostenibles [8].

Por ejemplo, el sector transporte por carretera consume a nivel mundial alrededor 49.7% de los combustibles derivados del petróleo [9] y es responsable del 24% de emisiones globales de CO_2 [10]. En el caso de la subregión andina y el resto del cono sur representan 41% y 33% respectivamente del consumo energético para el sector transporte [11]. El consumo energético en el sector de transporte en el Ecuador está dado por el 43 % de gasolina, 45 % de diésel, mientras que el 0,01 % es electricidad. Cabe indicar que el transporte terrestre demandó el 87 % del total de la energía en este sector con la participación del 71 % en carga liviana por vehículo a gasolina (1 a 3 pasajeros), y el 20 % en carga liviana por vehículo a diésel [12]. Además, hay que tener en cuenta que buena parte del combustible para transporte terrestre no se produce en Ecuador trayendo como consecuencia una balanza de pagos con déficit. En el año 2015, el 70 % de gasolina y el 69 % de diésel demandado en este sector fue importado, a diferencia de la electricidad cuyo porcentaje de importación fue del 2 % [13].

Existen múltiples esfuerzos internacionales, como el protocolo de Kioto o el reciente acuerdo de Paris, que buscan reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, particularmente CO_2, y de los cuales se han propuesto nuevas tecnologías que contribuyan a una movilidad sostenible. Adicionalmente, entre los retos más importantes para avanzar hacia políticas que fomenten una movilidad sostenible están: aumentar la calidad del transporte público, mejorar la planificación urbana, promover el transporte compartido o masificar el uso de bicicletas, desafiando así al crecimiento exponencial del uso de automóviles privados que se da en muchas ciudades del mundo. Los vehículos eléctricos son un claro complemento a las acciones antes citadas pues promueven el cambio

hacia el uso de un medio de transporte eficiente y amigable con el ambiente. Sin embargo, cualquier política dirigida a una movilidad sostenible debe reconocer que los recursos públicos son escasos y deben priorizarse hacia las iniciativas más rentables [14].

El cambio hacia una movilidad sostenible es un reto aún mayor en países en desarrollo pues el crecimiento poblacional viene acompañado generalmente con el incremento del nivel de ingresos, lo que podría llevar a un mayor número de automóviles en dichos países. En la región latinoamericana, por ejemplo, entre 2010 y 2015 la tasa de crecimiento poblacional fue del 1.05% anual [15], mientras que la tasa de índice de motorización (IDM) de vehículos nuevos en ese mismo periodo se ubicó en un promedio de 10.6 autos por cada mil habitantes. Solo en el año 2016 se registraron 5.4 millones de unidades nuevas en Latinoamérica [16], lo cual representa un mercado importante para la introducción de los vehículos eléctricos.

3 Caso de Estudio: Ciudad de Cuenca y su parque automotor

Para el presente estudio, se ha escogido a la Ciudad de Cuenca, que es la tercera ciudad en importancia en Ecuador, luego de Quito y Guayaquil. A diferencia de las otras dos ciudades que tienen más de dos millones de habitantes cada una, Cuenca, con aproximadamente 500.000 habitantes [17], y es considerada una ciudad intermedia y representa a la gran mayoría de urbes, no solo de Ecuador sino de Latinoamérica. Una ciudad intermedia es aquella que tienen más de 100.000 habitantes pero que no supera el millón, y que presenta características importantes para brindar una mejor calidad de vida a sus ciudadanos.

A partir de la creación de la Empresa Municipal de Movilidad del cantón Cuenca (EMOV), encargada de regir las políticas públicas en lo relacionado a la movilidad urbana, se han impuesto un conjunto de medidas destinadas a verificar las condiciones mecánicas del parque automotor circulante en Cuenca de forma periódica, obligando a los propietarios de los vehículos a someterlos a una Revisión Técnica Vehicular (RTV) anual, en centros técnicos certificados por la EMOV. En esta revisión es almacenada información relacionada a cada automotor, donde se destacan datos como: Número de placa, Números de serie, Características técnicas de vehículo, Recorrido indicado por el odómetro, Cantidad de emisiones de gases, etc.

El parque automotor registrado por la EMOV para el 2014 fue de 146 mil vehículos aproximadamente [18], clasificados en la zona de estudio, según [19] en 12 grupos en función a su utilidad, como se muestra en la Fig. 1.

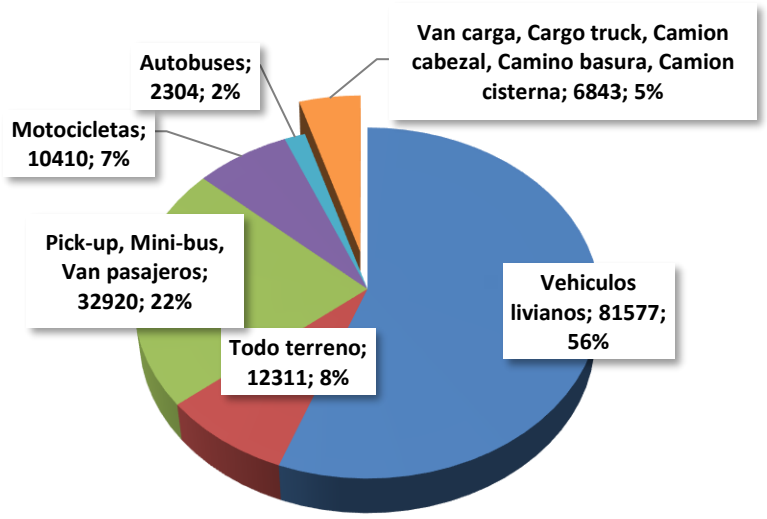


Fig. 1. Clasificación de vehículos automotores cantón Cuenca

Teniendo en cuenta el mayor segmento de esta clasificación con el 56% perteneciente al grupo de vehículos livianos, éstos pueden a su vez ser clasificados en función a tamaño del motor. Esto permitiría compararlos, en términos potencia, con los vehículos eléctricos disponibles en el mercado. En la Tabla 1, se muestra la clasificación del grupo de los vehículos livianos a gasolina en el cantón Cuenca.

Tabla 1. Partición del parque automotor liviano por cilindraje

Cilindraje (cc)	Cantidad	%
< 1400	16946	21%
>1400 y <2000	63995	79%

Del estudio, se observa que el segmento perteneciente a vehículos con motores entre 1400 y 2000cc es la mayor porción, abarcando el 79% del grupo de los vehículos livianos.

Con el fin de simplificar el análisis del estudio, cada grupo (Fig. 1), se ha dividido en sub-grupos en función al tipo de usuario, identificados como vehículos: *a*.-Privados, que incluyen todos los adquiridos por usuarios particulares. *b*.- De alquiler, aquellos de uso público con y sin chofer "*taxis*", y, *c*.- Gubernamentales, aquellos que pertenecen a entidades públicas (gobiernos locales, regionales y nacionales o que pertenecen a instituciones del Estado). El parque automotor presenta comportamientos individuales dada la naturaleza de cada grupo y sub grupo. A partir de los datos aportados por EMOV en el periodo comprendido entre el 2010 al 2015, es posible estimar

el promedio diario del indicador de Kilómetros de Vehículo Recorrido (KVR), indicador que permite hacer estimaciones sobre la demanda energética del parque automotor en el grupo en estudio.

En la Tabla 2. se muestra el recorrido diario promedio calculado mediante la técnica de estimación que considera el recorrido indicado en el odómetro y el periodo entre revisiones técnicas [20] según los datos aportados por la EMOV. En la tabla 2 se han analizado solamente los grupos que utilizan gasolina como combustible. Es importante destacar que estos grupos superan el 85% del total del parque automotor en el cantón Cuenca.

Tabla 2. Recorrido promedio diario en (Km).

Tipo	Privados	De alquiler	Gubernamentales
Vehículos livianos	36.04	200.29	134.14
Todo terreno	36.58	200.29	74.77
Pick-up	37.37	135.2	131.95

Como se observa en la Tabla 2, el sub grupo que presenta mayor recorrido diario son los de alquiler, con un recorrido superior a 5 veces a los del grupo de privados, aspecto que repercute, en la misma proporción, en el consumo de energía para este sector.

Desde el punto de vista de consumo de combustibles derivados del petróleo, según [19] el rendimiento energético promedio del parque automotor en ciudades similares a Cuenca, presenta eficiencias energéticas como las mostradas en la Fig. 2.

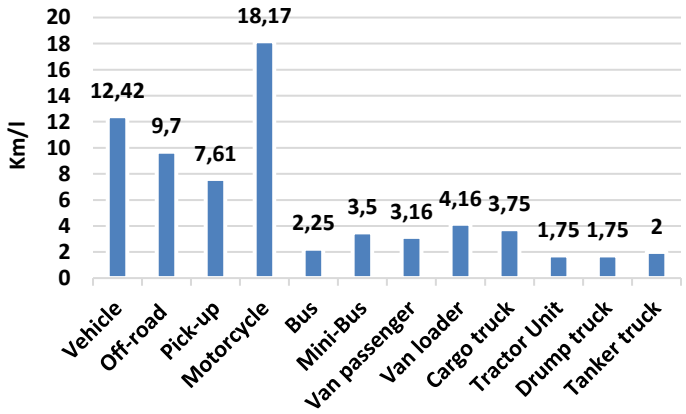


Fig. 2. Rendimiento promedio vehículos a combustión interna

Desde el punto de vista de consumo de combustible y emisiones de gases tóxicos a la atmosfera el sector de vehículos en el cantón Cuenca presenta una emisión estimada de 250000 Tn/año correspondiente al grupo de vehículos livianos. Este segmento es el propuesto en este estudio para ser sustituido por los vehículos eléctricos.

4 Eficiencia y autonomía de vehículos eléctricos en ciudades Latinoamericanas

Para establecer comparaciones de los consumos de los vehículos convencionales en relación a vehículos completamente eléctricos existen estudios que enfocan su rendimiento bajo pruebas de campo y estacionarias en ambientes controlados. Sin embargo, bajo todos los escenarios, los vehículos impulsados por máquinas eléctricas presentan comportamientos superiores en términos de eficiencia energética [21,22,23]. En este sentido, a modo de comparación, para el caso del Volkswagen Golf con Motor de Combustión Interna (ICE) y el e-Golf (mismo modelo y fabricante) la evolución en la eficiencia de éste, es del orden de 3,59 veces superior al primero. En la Fig. 3, se observa la eficiencia energética de 6 vehículos completamente eléctricos, en promedio los vehículos citados presentan un rendimiento cercano al 12.5 kWh/100km.

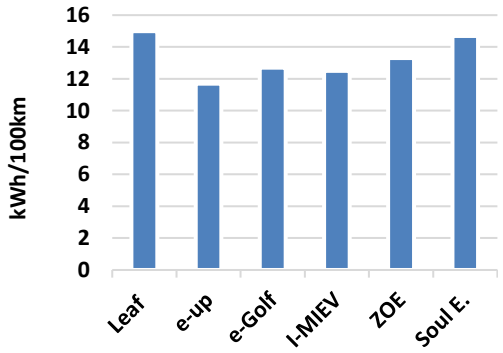


Fig. 3. Eficiencia energética en vehículos completamente eléctricos

Cuando se habla de vehículos eléctricos, la autonomía es la variable más importante a considerar. La autonomía comúnmente es expresada en kilómetros o millas por carga completa de las baterías del vehículo eléctrico, y puede diferir sustancialmente ante entornos geográficos y condiciones de manejo, pudiendo ser mucho menor que las cifras oficiales dadas por los fabricantes [24].

Se ha demostrado que diversos factores externos (a diferencia de los factores internos asociados con el propio vehículo, por ejemplo, parámetros de la potencia motriz y de la eficiencia interna) influyen en el consumo de energía de un vehículo eléctrico. Estos factores de impacto externo, se pueden clasificar en las siguientes categorías: 1) factores relacionados con las condiciones del tráfico que influyen indirectamente en los parámetros dinámicos del vehículo, como la velocidad y la aceleración; 2) factores relacionados con la infraestructura como el ángulo de inclinación de la carretera, la rugosidad de la superficie de la carretera; 3) factores ambientales tales como la temperatura ambiente y la velocidad del viento; y 4) factores de comportamiento de conducción, tales como agresividad del conductor, presión del freno, selección del modo de conducción, etc. [25,11].

Entre los factores ambientales, el clima desafía el uso de vehículos eléctricos de muchas maneras. Por ejemplo, con temperaturas bajas y condiciones adversas de la vía se incrementan las pérdidas energéticas. Por lo tanto, la autonomía se vuelve más corta. Además, el clima frío requiere una carga más lenta y un calentamiento de la batería, de

lo contrario, la vida útil de la batería se acortaría o podría dañarse. La Calefacción, Ventilación y Aire Acondicionado (HVAC) del espacio de la cabina podrían consumir grandes cantidades de energía de la batería principal, y tienen un efecto adverso en la autonomía. Sin embargo, el calentamiento y la ventilación deben satisfacer adecuadamente las necesidades del usuario, de lo contrario, los vehículos eléctricos no disfrutarán de un gran éxito en su popularización [24].

En cualquier caso, el elemento que delimita principalmente la autonomía del VE son los sistemas de almacenamiento de energía. Las baterías pueden incidir en la adopción de vehículos eléctricos por parte del consumidor al menos en dos características importantes del vehículo: el costo y la autonomía con una carga completa. El costo de la batería es una fracción significativa del costo total del vehículo, y la capacidad de energía de la batería determina severamente la autonomía [26].

En [27], se realizan estudios económicos sobre los sistemas de almacenamiento en vehículos eléctricos, en donde la tendencia de precios de estos sistemas de almacenamiento (litio, cobalto, tierras raras, entre otros [27]), está en el orden de $130/kWh, y se estima que presentarán una disminución en su precio hasta llegar a $90/kWh en 2025. Por ejemplo, debido a este factor, la reducción proyectada en el costo del banco de baterías de un vehículo modelo Bolt [27] implica una reducción en los costos totales de fabricación del vehículo en $4500 o el 12 % del precio total del vehículo.

En el caso de ciudades Latinoamérica el comportamiento de la eficiencia de los vehículos eléctricos no está plenamente estudiado. Sin embargo, estudios preliminares efectuados en Cuenca, indican comportamientos satisfactorios como los mostrados en la Tabla 3, donde se muestra el comportamiento de eficiencia energética de un vehículo eléctrico KIA Soul electric, bajo diferentes ciclos de prueba en ambientes controlados. Los ciclos probados son el FTP-75, NEDC y WLP [28, 29].

Tabla 3. Eficiencia Kia Soul Electric. Ambiente controlado

Prueba	FTP-75	NEDC	WLP
Eficiencia Batería - Motor	83.3%	87.2%	91.3%
Eficiencia Motor - Neumáticos	76.2%	63.9%	64.4%
Eficiencia Global	63.4%	55.7%	58.7%

En las pruebas bajo ambientes controlados se obtiene un rendimiento global promedio del 59.26 %, eficiencia superior a los obtenidos con los vehículos a combustión interna. Adicionalmente, los vehículos eléctricos presentan características técnicas adicionales que ayudan a mejorar la eficiencia energética global incidiendo en la autonomía. Es el caso de la capacidad de regeneración energética mediante el frenado regenerativo, que consiste en un convertidor que transforma la energía cinética en energía eléctrica que pueda ser almacenada nuevamente en la batería. En el caso del vehículo en estudio, bajo los ciclos mencionados, presenta una relación de energía consumida vs. energía regenerada cercana al 15%, mientras que, en ambientes urbanos, y de alta velocidad presenta una relación del 36%.

En cuanto a la autonomía, en la Tabla 4, se observa el comportamiento del vehículo en estudio, bajo 3 ambientes distintos. En el caso del ambiente urbano, se caracteriza por una continua aceleración y desaceleración con velocidad promedio de 27Km/h, mientras el ambiente de alta velocidad presenta una velocidad promedio de 60km/h.

Tabla 4. Autonomía Kia Soul Electric. Pruebas de campo (km)

Autonomía	Urbano	Mixto	Alta velocidad
Experimental	188	169	144
Dato fabricante	193	169	148

El estudio solo puede mostrar una autonomía relativa, dado que existen múltiples factores que inciden directamente sobre este indicador, no solo depende de factores externos, sino también del estilo de conducción aplicado. Sin embargo, con el objeto de extender la vida útil del banco de batería es necesario evitar descargas profundas que dependiendo de la tecnología puede estar entre el 15% y 6% de la capacidad nominal, condicionando aún más la autonomía del vehículo eléctrico.

5 Estimación de consumo energético y su alimentación a partir de fuentes renovables

Cuando se habla de fuentes renovables, su potencial está sujeto a una determinada zona geográfica. Estudios sobre las capacidades de la región latinoamericana destacan a Brasil y Chile con un importante potencial de energía renovable no convencional, dado que tienen grandes posibilidades de elevar su producción de energía solar y eólica. En este contexto Chile tiene más de la mitad de la capacidad solar de América Latina y en Brasil se concentra casi el 60% de la capacidad eólica de la región [30]. Considerando los vehículos eléctricos presentes en el mercado, segmento de vehículos livianos con capacidad inferior a los 200hp. (Kia Soul Electric, Nissan Leaf, BMW i3, BYD e5, etc.), y que presentan un consumo promedio de 13kWh/100km, es posible estimar la energía que diariamente se consumiría por los VE que reemplazarían a los vehículos livianos de Cuenca, si se recorren las distancias indicadas en la Tabla 2. La energía estimada se presenta en la Tabla 5.

Tabla 5. Estimación consumo energético diario por vehículo eléctrico en Cuenca (kWh)

Tipo	Privados	De alquiler	Gubernamentales
Vehículos livianos	4.5	25.04	16.76

En el cantón Cuenca se encuentran matriculados cerca de 76000 del grupo de vehículos livianos y sub grupo privados, y cerca de 4800 del grupo de vehículos livianos y sub grupo de alquiler, que representan en conjunto el 56% del parque automotor del cantón, con recorridos diarios de 2.73 y 0.96 millones de kilómetros, respectivamente. En base a este escenario se obtiene un consumo estimado de 108.7 millones de litros de gasolina

anual, lo que representa un gasto económico de 42.5 M$ anual, para un costo de 1.48 $/gal.

En relación de capacidades energéticas a partir de fuentes renovables, el cantón Cuenta presenta comparativamente mayor capacidad de generación solar fotovoltaica en relación a energía eólica, dado que en el área del cantón se presentan velocidades de viento menores a 4.5m/s y densidad de potencia cercana a 100 W/m^2 [31]. En este sentido, si el cantón presenta radiaciones solares globales con promedio anual de 4100 Wh/m^2/día [32], y si dispone una eficiencia de conversión del η=16% involucrando la eficiencia de paneles solares y conversión de energía, es posible plantear un escenario de la sustitución de los vehículos con motores menores a 2000 cc de uso privado y de alquiler, la Tabla 6, muestra las capacidades energéticas a partir de energía solar fotovoltaica, además se estima el área mínima necesaria para su generación.

Tabla 6. Estimación de demanda energética diaria en vehículos eléctricos en Cuenca

Vehículos	Privados	De alquiler
Energía diaria	355.68 MWh	124.94 MWh
Potencia nominal	83.12 MW	29.20 MW
Área mínima	54.2 Ha	19.04 Ha

De los datos obtenidos en la Tabla 6, se observa que para el caso de los vehículos privados es necesario como mínimo una granja solar de 83.12 MW que produzca al menos 355.68 MWh/día en una extensión de 54.2 Ha más las áreas de servicio de la granja solar. En total el área destinada a los paneles solares podría representar el 0.017 % de la extensión del cantón. Para el caso de los vehículos de alquiler es necesario como mínimo una granja solar de 29.20 MW que produzca al menos 124.94 MWh/día en una extensión de 19.04 Ha, más las áreas de servicio, esta área podría ser el equivalente al 0.0062 % del área del cantón Cuenca. En términos económicos, utilizando la estimación de costos a gran escala mostrada en [33], que representa 1.34 $/Wac para instalaciones mayores a 2 MW en paneles fijos, se podrían necesitar aproximadamente 111.38 M$ y 39.12 M$, respectivamente, para gastos de instalación de las granjas solares, faltando los gastos de operación y mantenimiento de las instalaciones, que podrían representar entre el 1 y 3% de la inversión.

En comparación a los costos de instalación de la alternativa sostenible mediante fuentes renovables, los gastos anuales en combustible indicados representan cerca del 28.23 % del costo inicial con la infraestructura indicada, lo que podría resultar atractiva está solución renovable, en términos económicos.

6 Uso de la red eléctrica disponible y efectos de la progresiva penetración de los vehículos eléctricos

Hoy en día la incorporación fuentes de energía renovable no convencional a los sistemas eléctricos instalados en países latinoamericanas tiene una participación baja en

términos porcentuales. Para el caso de la energía solar fotovoltaica destaca Chile con un aporte del 9.6% en su matriz de generación [34], esto debido a múltiples factores, que varían desde las políticas públicas en el sector energético hasta condiciones climáticas de la zona. No obstante, el uso de energía solar fotovoltaica presenta unas características técnicas desfavorables para la electro-movilidad, dado que está sujeto a aspectos como la dependencia exclusiva de la radiación instantánea en el caso de no disponer sistemas de almacenamiento y los sistemas de distribución respectivos. En este sentido, para el uso efectivo de los sistemas de distribución disponibles en las ciudades, es necesario determinar la capacidad instalada y la curva de demanda media de la zona de operación. Dependiendo de la naturaleza de la matriz energética de la zona, es factible una incorporación progresiva, tanto del número de vehículos eléctricos (demanda) como de la oferta solar fotovoltaica, analizando la capacidad instalada del sistema eléctrico y su potencial energético.

En el caso del sistema energético Ecuatoriano, donde el 56% es suministrado a partir de centrales Hidroeléctricas [35], y tomando como caso de estudio el sistema de distribución eléctrica de la Ciudad de Cuenca, se puede proyectar una penetración progresiva de VE. El sistema urbano de distribución en Cuenca tiene una capacidad instalada de 190MVA compuesta básicamente por 8 sub estaciones [36] con sus respectivos alimentadores con una capacidad cercana a 131MVA permitiendo un manejo de 59MVA para posible expansión del sistema. Por ejemplo, las sub-estaciones 01, 03 y 04 que suministran energía a gran parte del centro de la ciudad, presentan una capacidad instalada de 80MVA [36] y curvas de demanda típicas como las mostradas en [37], con un consumo promedio 46MVA en el periodo de 24 horas, y una capacidad sin uso cercana al 43%.

Si se toma en cuenta una incorporación de energía solar fotovoltaica que represente una potencia pico únicamente del 10% (19MWp), de la capacidad instalada del sistema de distribución de la Ciudad, se podría alcanzar una energía de 81.28MWh, pudiendo alimentar en promedio 18062 vehículos del segmento privado o 3246 de alquiler, lo que representa más del 20% y 67% de los vehículos privados y alquiler respectivamente sin cambios considerables en el sistema de distribución actual de la ciudad. Para la inclusión total de un parque automotor eléctrico, sería necesario realizar cambios importantes en el sistema de distribución (repotenciación de líneas, cambio de transformadores, etc.), así como modificar el patrón de consumo, dado a la disponibilidad de la energía. Sin embargo, el ejemplo propuesto puede representar un inicio hacia la transición al uso de VE sin cambios considerables en el sistema de distribución de energía eléctrica aplicando un balance neto, permitiendo que la energía generada por la componente solar fotovoltaica pueda ser utilizada sin restricción de horario por los VE.

7 Conclusiones

El presente estudio muestra un análisis sobre la factibilidad de sustitución de vehículos a combustión interna por VE alimentados a partir de energías renovables. En el estudio se analiza la composición del parque automotor del cantón Cuenca, donde se determina que cerca del 56 % del mismo pertenece al segmento con cilindraje inferior a 2000 cc,

y recorren en promedio 36 km diarios. Bajo el escenario de una sustitución total de este segmento por vehículos eléctricos, estos demandarían un consumo energético diario cercano a 480 MWh/día el cual puede ser aportado por la capacidad solar fotovoltaica en la zona de estudio por un conjunto de parque solares con capacidad de 112.32 MW en una extensión cercana a 73.24 Ha, que representa el 0.02 % del cantón Cuenca. En términos económicos, la instalación de la infraestructura energética necesaria podría representar 3.54 veces el gasto anual en combustible consumido por el segmento vehicular en estudio. Desde el punto de vista de infraestructura, el estudio indica que con una incorporación de energía solar fotovoltaica equivalente al 10% de la capacidad total instalada en la zona de estudio, se podría sustituir hasta el 20% y 67% de los vehículos convencionales por vehículos eléctricos, en los segmentos privado y de alquiler, respectivamente.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Departamento de Investigación de la Universidad de Cuenca (DIUC) y las Red Ecuatoriana de Universidades para Investigación y Postgrados (REDU) por el financiamiento del proyecto “Más allá del petróleo: un estudio de la relación entre la forma urbana y el transporte en dos ciudades del Ecuador”.

Referencias

1. Mori, Koichiro and Fujii, Toyonobu and Yamashita, Tsuguta and Mimura, Yutaka and Uchiyama, Yuta and Hayashi, Kengo, Visualization of a City Sustainability Index (CSI): Towards Transdisciplinary Approaches Involving Multiple Stakeholders, Sustainability, Vol. 7, 2015.
2. Sustainable Urbanization in Asia and Latin America, Asian Development Bank and Inter-American Development Bank, 2014.
3. Yosef Rafeq Jabareen, Sustainable Urban Forms Their Typologies, Models, and Concepts, Journal of Planning Education and Research, Vol 26, Issue 1, 2006.
4. Lee G., et. al. (2015). The Effect of the Built Environment on Pedestrian Volume in Microscopic Space - Focusing on the Comparison Between OLS (Ordinary Least Square) and Poisson Regression. Journal of Asian Architecture and Building Engineering, 14(2), 395–402.
5. Barton H., et. al. The paradox of intensification, Journal of Transport Policy, 18(1), 46-52, 2011.
6. Mahmoud Shepero, Joakim Munkhammar, Joakim Widén, Justin D.K. Bishop, Tobias Boström, Modeling of photovoltaic power generation and electric vehicles charging on city-scale: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 89, 2018, Pages 61-71.
7. Declaración del foro Continental de Ciudades, Intermedias de Latinoamérica, 28 de febrero al 02 de marzo de 2018. Cuenca, Ecuador.
8. Dalkmann H. and Sakamoto K. (2011) Transport: Investing In Energy and Resource Efficiency. Green Economy Report, UNEP.

9. Key world energy statistics, International Energy Agency, https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld2017.pdf; 2017 last accessed 2018/03/01.
10. CO_2 Emissions from Fuel Combustion, International Energy Agency, https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/CO2EmissionsfromFuelCombustionHighlights2017.pdf; 2018, last accessed 2018/03/01.
11. Kezhen Hu, Jianping Wu, and Tim Schwanen, Differences in Energy Consumption in Electric Vehicles: An Exploratory Real-World Study in Beijing, Journal of Advanced Transportation, vol. 2017, Article ID 4695975, 17 pages, 2017. https://doi.org/10.1155/2017/4695975.
12. David Delgado Noboa, Balance Energético 2016, Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos, Tech. Rep. [En línea]. Disponible: https://issuu.c*om/sectoresestrategicos/docs/balance_energe__tico_2016.* last accessed 2018/03/22.
13. Santiago Flores Gómez, Aspectos de sustentabilidad y sostenibilidad social y ambiental, CONELEC, Tech. Rep. [En línea]. Disponible: http://www.regulacionelectrica.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/12/ Vol4-Aspectos-de-sustentabilidad-y-sostenibilidad-social-y-ambiental.pdf, last accessed 2018/03/22.
14. La incorporación de los vehículos eléctricos en América Latina, Banco Interamericano de Desarrollo, https://publications.iadb.org/bitstream/handle/11319/7854/La-incorporacion-de-los-vehiculos-electricos-en-America.pdf; 2016, last accessed 2018/03/01.
15. Base de datos CEPAL, http://estadisticas.cepal.org/sisgen/ConsultaIntegrada.asp?IdAplicacion=1&idTema=1&idIndicador=31&idioma=e, last accessed 2018/03/01.
16. Asociación Colombiana de vehículos automotores, Con ventas globales de casi 94 millones de vehículos matriculados, https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=4&ved=0ahUKEwiqxOKfhcTZAhVK3FMKHeW_BEIQFgg4MAM&url=http%3A%2F%2Fwww.andemos.org%2Fwp-content%2Fuploads%2F2017%2F02%2FComunicado-Indice-de-Motorizacion-2016.pdf&usg=AOvVaw3t6Iysc2J8kmU7iR9-jie6; 2017, last accessed 2018/03/01.
17. http://www.ecuadorencifras.gob.ec/censo-de-poblacion-y-vivienda/, last accessed 2018/05/01
18. Inventario de Emisiones Atmosféricas del Cantón Cuenca 2014, https://www.researchgate.net/profile/Rene_Parra/publication/311789933_Inventario_de_Emisiones_Atmosfericas_del_Canton_Cuenca_2014/links/585a977208aeabd9a58cd0a7/Inventario-de-Emisiones-Atmosfericas-del-Canton-Cuenca-2014.pdf?origin=publication_detail ; 2014, last accessed 2018/04/01.
19. Cevallos, J. Estimating road transport fuel consumption in Ecuador. Energy Policy, vol. 92, p. 359-368, 2016.
20. Juan Pablo Góngora Pérez, “Indicador Kilómetros-Vehículo Recorridos (KVR) Métodos de cálculo en diferentes países” Instituto de Políticas para el Transporte y el Desarrollo de México, 2012.
21. H. Laitinen, A. Lajunen and K. Tammi, Improving Electric Vehicle Energy Efficiency with Two-Speed Gearbox, *2017 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, Belfort, 2017, pp. 1-5. doi:10.1109/VPPC.2017.8330889
22. D. Nedeljković, "Analysis of plug-in hybrid electric vehicles efficiency by plug-in electric hybrid factor (Pihef)," 4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, Istanbul, 2013, pp. 984-988.
23. S. Funke and P. Plotz, A Comparison of Different Means to Increase Daily Range of Electric Vehicles: The Potential of Battery Sizing, Increased Vehicle Efficiency and Charging

Infrastructure, 2014 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), Coimbra, 2014, pp. 1-6.
24. J. Laurikko, R. Granström, A. Haakana, Assessing range and performance of electric vehicles in nordic driving conditions-Nordic driving conditions – Project ”RekkEVidde”, World Electric Vehicle Journal Vol. 5 - ISSN 2032-6653, 2013.
25. X. Qi, G. Wu, K. Boriboonsomsin, y M. J. Barth, Data-driven decomposition analysis and estimation of link-level electric vehicle energy consumption under real-world traffic conditions, Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2017.
26. M. T.-G. Chang, “Performance targets for electric vehicle batteries,” Ph.D. dissertation, Massachusetts Institute of Technology, 2015.
27. Patrick Hummel, “Global Automobiles,” UBS, Tech. Rep. [En línea]. Disponible: http://www.advantagelithium.com/_resources/pdf/UBS-Article.pdf, 2017, last accessed 2018/04/22.
28. Jörg Kühlwein, John German, Anup Bandivadekar, “Development of test cycle conversion factors among worldwide light-duty vehicle CO_2 emission standards”, The International Council On Clean Transportations, Sep. 2014.
29. Jelica Pavlovic and Alessandro Tansini and Georgios Fontaras and Biagio Ciuffo and Marcos Garcia Otura and Germana Trentadue and Ricardo Suarez Bertoa and Federico Millo, The Impact of WLTP on the Official Fuel Consumption and Electric Range of Plug-in Hybrid Electric Vehicles in Europe, SAE Technical Paper, 2017.
30. https://www.nytimes.com/es/2018/02/02/opinion-energias-renovables-america-latina/, last accessed 2018/06/22.
31. Atlas Eólico del Ecuador con fines de generación eléctrica, Ministerio de electricidad y energía renovable, 2013.
32. Consejo Nacional de Electricidad, CONELEC, *Atlas Solar* del *Ecuador* con fines de Generación Eléctrica, 2008.
33. Ran Fu, David Feldman, Robert Margolis, Mike Woodhouse, and Kristen Ardani, U.S. Solar Photovoltaic System Cost Benchmark: Q1 2017, Technical Report NREL/TP-6A20-68925, National Renewable Energy Laboratory, 2017.
34. Dirección de Estudios y Contenidos Generadoras de Chile A.G., “Boletín del Mercado Eléctrico Sector Generación”, Marzo 2018.
35. Balance Nacional de Energía Eléctrica Mayo 2018, http://www.regulacionelectrica.gob.ec/balance-nacional/, last accessed 2018/09/08.
36. Diego Fransisco Torres Moscoso. Analisis energetico de un sistema de propulcion electrico alternativo para la movilidad en el canton Cuenca. Univerisdad del Azuay. 2016.
37. Julio R. Gomez, Impacto de las estaciones de carga para vehículo eléctrico en la ciudad de Cuenca – Ecuador, Instituto politecnico de Leiria, 2017.

La Diputación provincial de Soria y su compromiso con la energía y el clima

José Antonio Martínez Domínguez – Diputación provincial de Soria – C/ Caballeros 17, 42002 Soria – España

sepen@dipsoria.es

Abstract.

La estructura organizativa de la administración local en España, las Diputaciones provinciales tienen una labor de asesoramiento técnico a los municipios que no disponen de ellos y además de realizar actuaciones propias.

En el marco de la energía y el clima, la Diputación provincial de Soria lleva unos años desarrollando actuaciones, promocionando y difundiendo las distintas actuaciones que contribuyan a ello y partiendo de un estudio de ahorros energéticos, medioambientales y económicos obtenidos en la sustitución de fuentes de luz clásicas de alumbrado público a tecnología led y productos de Smart Cities en la provincia de Soria, se detectan unas sinergias de gestión que llevan a crear una estructura dentro del organigrama interno, creando el servicio provincial de energía (SEPEN – SORIA) desde cuyo departamento se han canalizado la mayoría de las acciones relacionadas con la energía y el clima dentro del ámbito de: alumbrado exterior, protección pasiva de edificios, energía solar fotovoltaica en autoconsumo, contaminación lumínica, aerotermia, Smart rural, etc.

Estas actuaciones y sus conclusiones son las que se exponen a continuación.

Palabras clave: Diputación Provincial, Energía y clima municipal, Eficiencia energética municipal.

1 Introducción

La estructura territorial y administrativa española, pone en manos de las Diputaciones la asistencia técnica a los municipios que carezcan de ellos y con ello los relacionados con la energía y el clima.

Por otra parte, la revolución que se esta viviendo en la industria de la energía y las telecomunicaciones, necesita de una fuerte preparación técnica para que los sistemas y los productos instalados cumplan con las expectativas que se espera de ellos y ayuden a reducir los consumos energéticos reduciendo las emisiones de CO_2, e implantando sistemas de gestión de servicios públicos que usando procesos lógicos ayuden a gestionar la energía de forma más eficiente.

La diputación de Soria se encuentra inmersa en un proceso de implantación de estas tecnologías de forma experimental en unos casos y en otros con tecnología más experimentada y madura, los aspectos en los que se trabaja son:

1.- Organización administrativa.
2.- Alumbrado exterior.
3.- Contaminación lumínica
4.- Protección pasiva de edificios
5.- Aerotermia y biomasa.
5.- Autoconsumo
6.- Productos de Smart city

2 Organización administrativa

Para atender las demandas de los ciudadanos y municipios ha creado dentro de su estructura administrativa el SERVICIO PROVINCIAL DE ENERGÍA, un departamento especializado en temas energéticos y con los siguientes objetivos y funciones:

OBJETIVOS:

- Promoción, desarrollo, impulso, gestión y coordinación e actuaciones destinadas a incrementar la eficiencia energética y el uso de las energías renovables.
- Sensibilización y concienciación sobre el desarrollo sostenible mediante actuaciones de comunicación y difusión.
- Gestión energética eficiente de los edificios e instalaciones de la Diputación y de los pueblos de la Provincia.

FUNCIONES:

- ✓ Asesoramiento técnico, gestión de proyectos, dirección de obras, etc. de los distintos planes que la Diputación realiza en materia energética en la provincia y de aquellos municipios que lo solicitan.
- ✓ Gestión de los consumos energéticos de la Diputación Provincial y colaboración en el seguimiento de los mismos en los Ayuntamientos de la provincia a través de la monitorización de estos. Realización de Certificación Energética de los Edificios de la Diputación Provincial y de los Municipios que lo soliciten.
- ✓ Acciones de formación, difusión y promoción, realizando campañas de sensibilización, realización e impartición de cursos, organización y participación en jornadas y seminarios de divulgación e información sobre las novedades tecnológicas y normativas en materia energética y de medioambiente, edición de manuales de buenas prácticas, colaboración con medios de comunicación para reportajes de difusión, cambio climático, etc.
- ✓ Información a los ciudadanos en general, al sector público y privado, de los programas de financiación y subvenciones nacionales, regionales y comunitarias en materia de energía y medioambiente, además de incluir la gestión

de estas en los entes públicos que así lo soliciten y el apoyo institucional en materia energética.

3 Alumbrado exterior.

3.1 Estudio previo

Introducción

El "*ESTUDIO DE AHORROS EN EL ALUMBRADO PÚBLICO DE LA PROVINCIA DE SORIA*".que he realizado como funcionario de la Diputación de Soria ha puesto de manifiesto la obsolescencia de las instalaciones de alumbrado público existentes en la provincia de Soria, que unida a las mejoras tecnológicas que se están experimentando en las fuentes de producción de luz, a la madurez de la tecnología *LED* en estos últimos años como sistema mucho más eficiente que las clásicas lámparas de descarga actualmente en uso para iluminación pública y a la incorporación de sistemas de control basados en la Tecnologías de la Información y Comunicación (TICs), puede hacer que esta época sea decisiva para que se produzca un importante cambio en esta materia.

Del análisis de la situación actual (fig 1) se pone de manifiesto que el potencial de cambio en este sector es del 81 % en diciembre de 2015 con ahorros energéticos y económicos que se acercan al 80 % en la mayoría de los casos

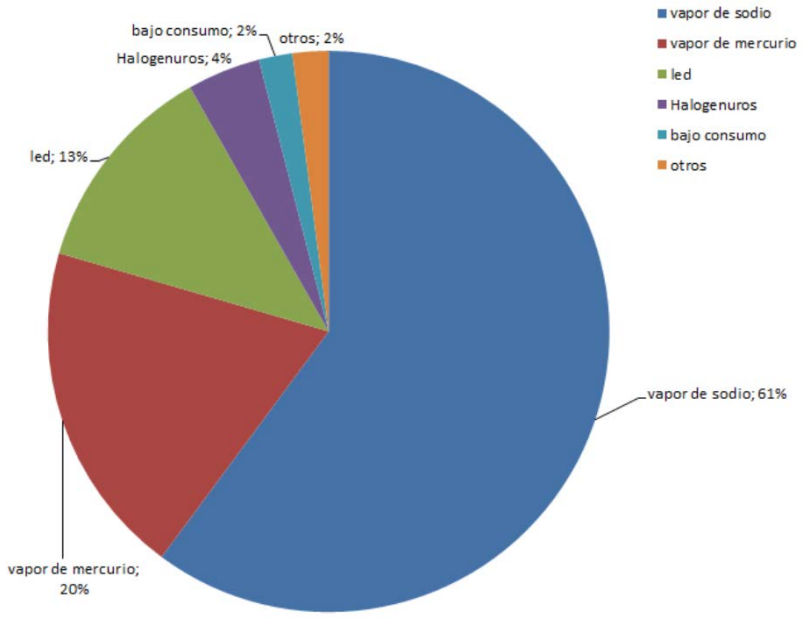


Figura 1 Escenario del alumbrado de la provincia de Soria en diciembre de 2015

Se deberían aprovechar las reformas que sin duda se van a producir en la sustitución de estos sistemas de iluminación, para que se realicen con las mejores garantías de calidad y de protección medioambiental, intentando instalar sistemas que optimicen:

- La eficiencia energética del sistema de alumbrado público.
- La calidad de los componentes que se van a instalar.
- La valorización de los elementos singulares de los Municipios que transmiten cultura, orgullo y sentimientos a sus vecinos y visitantes.
- La uniformidad y calidad de la luz que utilizamos.
- La contaminación lumínica.
- La incidencia del alumbrado público en la biodiversidad que nos rodea mejorando su salud.
- La utilización este cambio como vehículo para incorporar las TICs que mejoren y amplíen los servicios prestados a los ciudadanos y su calidad de vida, tales como los incluidos en las llamadas Smart Cities.
- La transmisión de emociones, mediante la variación de los colores en edificios singulares, que canalicen situaciones de apoyo de los ciudadanos o colectivos ante situaciones concretas de sucesos.

En definitiva, que los esfuerzos destinados a canalizar estas mejoras tecnológicas puedan redundar en un mayor beneficio de la sociedad a través del menor consumo energético y de la mejora del Medio Ambiente con importantes reducciones de CO2, responsable del cambio climático, a la vez que se mejora la prestación de servicios y la calidad de vida de los ciudadanos.

Conclusiones

De este estudio, pueden extraerse las siguientes conclusiones:

- ✓ La tecnología *LED* es una aportación al alumbrado público que, con una inversión prevista en la provincia de 14.947.680 €, produce una fuerte capacidad de ahorro energético de 8.905.473 kWh/año, económico de 1.664.002 €/año y medioambiental de 2.948 t CO_2/año, estimando un 82% de ahorro sobre los consumos actuales.
- ✓ La telegestión precisa de una inversión 4.190.700 € y, aunque no produce ahorros importantes: energéticos de 711.266 kWh
- ✓ Wh/año, económicos de 132.902 €/año y medioambiental de 235 t CO_2/año, estimando un 30% de ahorro sobre el consumo resultante tras la implantación del *LED. E*sta infraestructura puede abrir la puerta a la implantación de las TICs en los municipios formando parte de proyecto más global con mayores implicaciones sociales y económicas.
- ✓ La incorporación de ambas tecnologías puede ofrecer ahorros energéticos del 89% y económicos cercanos los 1.800.000 €/anuales.
- ✓ La luz blanca mejora la visión nocturna y ayuda a reducir los niveles de iluminación con mejores percepciones de visión, reduciendo por tanto la contaminación.
- ✓ La iluminación nocturna produce efectos adversos sobre la biodiversidad, y precisa controlar: sus niveles, la intrusión en las viviendas, la emisión en el hemisferio superior y las frecuencias que emite la luz según el espacio que se precise iluminar.
- ✓ Un alto porcentaje de las instalaciones de alumbrado público provinciales se encuentran fuera de normativa de seguridad y medioambiental, precisando ser adaptadas con celeridad.
- ✓ La adaptación de luminarias existentes cambiándoles elementos que las componen por otros distintos, normalmente de LED denominada *"retrofit"*, precisa una nueva justificación de seguridad, fotométrica, mecánica y térmica del comportamiento de todo el sistema, debiendo certificarse el conjunto resultante conforme UNE EN 60598-2-3. De no hacerse así, la instalación quedará fuera de Norma y las responsabilidades derivadas de ello pueden ser muy importantes.
- ✓ La incorporación de productos de *Smart Cities* avanzan de forma imparable para mejorar la calidad de vida de la sociedad, su incorporación al alumbrado público produce ahorros que pueden cifrarse en un 30%, además de poder compartir plataformas de la TICs con otros servicios diferentes del alumbrado público.

- ✓ Se precisa canalizar en uno o varios centros de control la irrupción de las TICs para poder ofrecer a los pequeños municipios sistemas de control por telegestión y otros productos de *Smart Cities*. Se considera que las opciones mancomunadas con control municipal son la mejor fórmula para prestar este servicio.
- ✓ En este cambio a LED en el que se encuentra la iluminación pública, se necesita informar y formar a: técnicos, ediles y ciudadanos para realizar instalaciones acordes a la normativa y con estándares de calidad adecuados, que mejoren su calidad de visión, la biodiversidad y el Medio ambiente que nos rodea, teniendo la vista puesta en la arquitectura necesaria para poder acoger los avances de las TICs.

3.2 Actuaciones de la Diputación de Soria en esta materia.

Las actuaciones de asesoramiento a los ayuntamientos y técnicos en la implantación de la tecnología que mejor se adapte a sus necesidades, así como el financiar y canalizar estos cambios tecnológicos se en llevado a cabo en varios frentes.

Supervisión de proyectos

En este campo se pretende asesorar a los ayuntamientos mediante un informe de supervisión, antes de que el proyecto encargado sea aprobado y explicar a los ediles cuales son las soluciones propuestas por el proyectista y se consideran acordes con los criterios que a continuación se exponen:

Se emite el presente INFORME DE SUPERVISIÓN, con el único objeto de informar al Ayuntamiento, de que el proyecto encargado contempla soluciones acordes con el actual estado de la técnica y partidas presupuestarias que puedan ejecutar una obra eficiente y segura, ***NO*** *se pronuncia sobre la competencia legal del técnico para redactar dicho proyecto:*

2.1–Cumplimiento de normativa sobre contratación

- *Memoria justificativa de la instalación a realizar:* ***Sí***
- *Precios unitarios y descompuestos:* ***Sí***

2.2-Cumplimiento de normativa de seguridad industrial Reglamento electrotécnico de baja tensión (REBT)

- *Memoria justificativa de las protecciones de las líneas a modificar:* ***Sí***
- *Memoria justificativa de las líneas en las zonas a modificar:* ***Sí***
- *Memoria justificativa de instalación de tierras en las zonas a modificar:* ***Sí***
- *Protección diferencial* ***Sí.***
- *Protección de sobretensiones.* ***Sí.***
- *Justificación del cumplimiento de la UNE 60598 a través de:*

a) *Declaración de conformidad CE y copia del expediente de tipo* ***SI***

b) *Certificado ENEC o equivalente.*

c) *Otra documentación equivalente (Especificar cuál)*

- *Partidas presupuestarias para adecuar la instalación modificada a la normativa SI*
- *Partida presupuestaria para abonar la legalización de la instalación.* ***Sí***

2.3- Cumplimiento de normativa sobre eficiencia energética acorde al Reglamento de eficiencia energética en instalaciones de alumbrado exterior (REEIAE)

- *Memoria justificativa del cumplimiento del REEIAE* ***Sí***
- *El proyecto recoge la clasificación de zona (REEIAE EA 03) acorde a la ubicación* ***E2 SI***
- *Iluminación acorde con la tipología del vial* ***Sí***
- *Memoria del cumplimiento del reglamento de eficiencia energética* ***Sí***
- *Luminaria acorde con las exigencias de la zona*
    - *FHSinst < 5%* ***Sí***
    - *Espectrometría acorde con las exigencias de la zona* ***3000 k SI***
    - *Deslumbramiento acorde a las exigencias del REEIAE EA 2 apartado 8* ***SI***

ESPECIFICACIONES:

3.1.- Legalidad

Se considera importante indicar que para garantizar que las instalaciones realizadas son acordes a la legalidad vigente, se solicite al instalador al finalizar la misma al menos:

- *Boletín de instalación eléctrica: (que garantiza cumplimiento de RD 842/2002 y RD 1890/2008)*
- *Acreditación de cumplimiento de RD 110/2015 Residuos*
- *Garantía de la instalación firmada por el encargado de prestarla.*
- *Etiqueta energética del alumbrado fruto de las mediciones reales.*

3.2.- Mantenimiento obligatorio

Así mismo, se informa al Ayuntamiento de la obligatoriedad de realizar un mantenimiento periódico de la instalación, tal como preceptúa el punto 3 de la ITC EA 06 (REAL DECRETO 1890/2008, de 14 de noviembre, por el que se aprueba el Reglamento de eficiencia energética en instalaciones de alumbrado exterior y sus Instrucciones técnicas complementarias.)

Preventivamente y de forma anual

- *Limpieza de luminarias.*
- *Pintura de soportes.*
- *Rondas de inspección*
- *Mediciones eléctricas y luminotécnicas.*

De estas operaciones se dejará constancia en un sistema de registro con los datos mínimos incluidos en la ITC y deberá ser realizado por una empresa autorizada en instalaciones eléctricas de baja tensión, (No necesariamente por la empresa que ha realizado la instalación).

3.3.- Inspecciones y verificaciones

Este mantenimiento no exime de la obligatoriedad de realizar las inspecciones periódicas o verificaciones, tal como indica la ITC-BT-05 (RD 842/2002) y en la ITC-IA-05 (RD 1890/2008) en los que se indica que en las instalaciones realizarán inspecciones o verificaciones cada 5 años:

- *Instalaciones de más de 5 kW de potencia instalada, por un Organismo de Control Autorizado (OCA) y de menos por una empresa instaladora eléctrica de baja tensión.*

CONCLUSIONES:

*Tras evaluar el proyecto presentado se puede considerar **APTO**, para poder obtener con su ejecución, la documentación necesaria para su inscripción en el correspondiente registro del Servicio Territorial de Industria, si bien y para mantener las condiciones de legalidad y de garantía deberán cumplirse las especificaciones indicadas en el punto anterior.*

Soria xx de xxxxxxxxx de 201x

- ***SR/A.*** xxxxxxxxx ***DEL AYUNTAMIENTO DE*** xxxxxxxx.

Con esta actuación se ha conseguido mejorar la calidad de las instalaciones y unificar los criterios técnicos accediendo a las novedades del sector de forma unificada y centralizada. Además, se ha conseguido que las instalaciones realizadas se ajusten a la legalidad vigente.

Planes provinciales

La financiación de las obras de eficiencia energética que los municipios realizan, lo hacen desde los Planes provinciales de cooperación, donde la Diputación cofinancia obras realizadas en los municipios y que materia de alumbrado en los últimos años han supuesto inversiones de:

Se han de invertido por parte de Diputación en los municipios de la Provincia durante estos últimos años a través de Planes Provinciales y de eficiencia energética :

- En 2013 359.000 €
- En 2014 867.000 €
- En 2015 1.598.000 €
- En 2016 561.681 €

  En 2017 626.663 €

Peticiones registradas en planes provinciales para 2018 307.973 € a lo que hay que sumar las agrupaciones para acceder a los fondos FEDER de 9.479.291 €

- Lo que en alumbrado público y desde el 2013 al 2017 totalizan 4.012.344 €
- Sumadas las peticiones del 2018, la cifra de obra impulsada por Diputación en esta materia supera los 13.799.548 €.
- De los cuales la Diputación ha subvencionado un 60% excepto en las que llevan fondos FEDER, que aportará un 10 % de la inversión real.

Se estima que la inversión de 13.799.740 € se han impulsado ha generado los ahorros anuales siguientes:

Energéticos	10.687.873 kWh/año
Emisiones de CO2	6.936 t CO2/año
Económicos	1.404.379 €/año

Asociación de municipios

La Diputación de Soria ha impulsado la creación de agrupaciones de municipios, para poder acceder a los fondos FEDER, desinados a proyectos singulares de entidades locales de menos de 20.000 habitantes en las siguientes condiciones:

- Designar a la Diputación, como interlocutor en esta línea de ayudas

- Constituirse en agrupación para renovar el alumbrado exterior.
- La Diputación ostenta la representación de la agrupación.
- Los Ayuntamientos ceden sus derechos en favor de la Diputación.

Con los siguientes compromisos.

- La Diputación gestiona la contratación de los proyectos, las obras y las direcciones técnicas.
- La Diputación aporta un 10 % de su valor.
- Los Municipios firmantes abonan el 40% del coste.
- Los Ayuntamientos ponen a disposición los terrenos y permisos necesarios para su ejecución.
- Tras ser recepcionadas las obras serán entregadas a los Ayuntamientos correspondientes.

Los resultados son:

- Numero de agrupaciones 11
- Municipios agrupados 94
- Presupuesto solicitado 9.479.291 €
- Subvención fondos FEDER. 739.645 €
- Subvención de Diputación 947.929 €
- Aportaciones municipales 3.791.716 €
- Puntos de luz a cambiar 12.113.-
- CO^2 previsto evitar 4.850 Toneladas de CO^2/año-

En la actualidad los expedientes se encuentran pendientes de resolución por parte de la administración.

4 Contaminación luminica.

La Diputación de Soria ha participado en la convocatoria de concesión de ayudas de la Fundación Biodiversidad, para la realización de proyectos en materia de adaptación al cambio climático 2017, con un proyecto titulado “Reducción del impacto negativo de la iluminación artificial nocturna de la provincia de Soria, como aspecto clave para proteger la biodiversidad de las zonas protegidas en la adaptación al cambio climático, y generación del empleo verde en astroturismo sostenible”.

Este proyecto tiene como objetivo el zonificar la provincia y dotarla de una herramienta que ajuste los niveles y frecuencias máximos a poder utilizar en el alumbrado exterior en función de la zona y su grado de protección medioambiental, protegiendo al biodiversidad y el impacto en el cielo nocturno, protegiendo y poniendo en valor los recurso naturales y medioambientales de la provincia y certificando zonas de la provincia libres de contaminación lumínica para observar las estrellas

5 Protección pasiva.

En materia de protección pasiva la diputación ha puesto en marcha acciones para rehabilitar viviendas municipales y particulares de la provincia con destino a alquiler, valorando para la elección de los beneficiarios la mejora de la etiqueta energética.

Se han presupuestado:
500.000 € para vivienda municipal con destino a alquiler.
200.000 € para vivienda particular con destino a alquiler.
En este momento ya se han adjudicado los fondos.

6 Autoconsumo.

Se ha firmado un acuerdo de colaboración entre la Dirección Provincial de educación de la Junta de Castilla y León en Soria y la Diputación Provincial de Soria, para la instalación de placas solares fotovoltaicas en el parque de maquinaria que la Diputación posee en la capital, con arreglo a las siguientes especificaciones:

El CIFP Pico Frentes desarrollará las funciones de estudio, diseño, montaje y monitorización de la instalación de energías renovables como práctica real para el alumnado.

La Diputación de Soria, habilitará un espacio óptimo del parque de maquinaria para la realización de la instalación y asumirá el coste total de los materiales necesarios para la ejecución del mismo que no podrá superar Diez mil euros (10.000 €).

La Diputación de Soria, se compromete también a permitir el acceso a las instalaciones resultantes de este acuerdo, para la realización de prácticas del alumnado del CIFP Pico Frentes.

Por otra parte se han solicitado ayudas para instalar solar térmica en autoconsumo en los cinco parques de bomberos que la Diputación dispone en la provincia atendiendo además, las necesidades térmicas mediante sistemas aerotérmicos.

7 Productos de smart cities.

También se ha firmado un acuerdo de colaboración entre la Consejeria de Fomento y Medio Ambiente de la Junta de Castilla y León y la Diputación Provincial de Soria, para la realización del proyecto, “TERRITORIO RURAL INTELIGENTE CASTILLA Y LEÓN” en el marco de la red de municipios digitales de Castilla y león y cofinanciado por fondos FEDER, en el que se desarrolla una plataforma de gestión inteligente de servicios públicos en las siguientes áreas:

Recogida de residuos.
Alumbrado inteligente.
Gestión del agua.

Posteriormente se pretende que pueda extenderse a otros servicios como pueden ser:

Patrimonio inteligente.
Aparcamiento inteligente.
Teleasistencia.
Monitorización ambiental.
Turismo.
Préstamo de bicicletas.

En la actualidad se está poniendo en marcha la primera fase, en la que se ha presentado la plataforma y se han instalado distintos sensores para conocer el funcionamiento y ver las distintas funcionalidades, antes de extrapolar al resto de los municipios las aplicaciones.

7.1 Recogida de residuos

En este campo se han instalado sensores en contenedores, para poder filtrar y optimizar las recogidas, dando alarmas en caso de llenados etc.

7.2 Alumbrado inteligente

En este campo, se integran los sistemas ya instalados en municipios en la plataforma, suelen ser sistemas de telegestión punto a punto, y se crean nuevos sensores en cuadros y luminarias recientemente instaladas que no disponen de este servicio.

Se pretende poder controlar los perfiles de iluminación adecuados al lugar y a el momento asi como el control de:

El sistema de gestión permitirá visualizar y proyectar en la plataforma digital (google maps) el conjunto de datos de la infraestructura organizada por zonas (puntos de luz, cuadros de mando, circuitos, equipo, etc.) con el objetivo de acceder a la información rápida e intuitivamente.

Para cada luminaria y para cada centro de mando se generará una ficha con la codificación previamente determinada, que contiene su descripción, ubicación, imágenes y características.

Los servicios que presentara el sistema son los siguientes:

- Detección de vandalismo en la instalación eléctrica (robo de energía, interrupción de la alimentación)
- Control de consumos: medición de los consumos energéticos y representación gráfica por hora, día, semana, mes y año
- Detección de fallos generales en el cuadro de mando y en cada una de las fases de los circuitos de salida.
- Control de las horas de funcionamiento de la instalación
- Encender y apagar el alumbrado de forma remota
- Detección de corrientes de fuga y emitir una alarma si se rebasa el límite establecido, con detector adecuado
- Generar alarmas de puerta de centro de mando abierta
- Hacer lecturas en tiempo real de tensiones, corrientes, factor de potencia y consumos de cada fase independientemente.
- Controlar en tiempo real las protecciones contra descargas atmosféricas del centro de mando bien sea el sistema de regulación con Equipos estabilizadores reductores en cabecera de línea o mediante el sistema de regulación punto a punto.
- Gestor documental donde tener almacenadas las documentaciones y revisones, tanto oficiales como de mantenimiento.

- Proyección de la información en otras plataformas digitales, GIS, fotografías, etc.
- Migración de información a partir de bases de datos existentes: Excel, SHP, CAD, etc.
- Adaptación de criterios de visualización, búsqueda o filtrado.
- Gestionar averías y toda la información asociada a las mismas, pudiendo realizar filtrados, búsquedas concretas, estado de las averías, tiempos de ejecución, etc.
- Creación de mapas con los puntos de luz afectados por las incidencias.
- Gestionar averías y mantenimiento a tiempo real.
- Planificar todas las tareas previstas para realizar el mantenimiento preventivo.
- Tener un control de incidencias y ordenes de trabajo.
- Planificar el equipo humano que va a realizar las tereas de mantenimiento adaptando aptitudes y recursos al tipo de trabajo a realizar.
- Ahorro energético por encendido mínimo en las acciones de mantenimiento.
- Gestión de itinerarios para optimización de tiempos.
- Seguimiento y control del mantenimiento de los distintos dispositivos del alumbrado
- Generar un histórico de actuaciones por luminaria.
- Crear un registro de material y mano de obra de mantenimiento.
- Registro de responsabilidad por usuario.
- Informes de indicadores: mano de obra, incidencias, materiales, etc.
- Detención de puntos problemáticos en la instalación.

Todo ello se realizara a través de un Smartphone o Tablet, si además se dispone de modulo APP, facilitando el mantenimiento y haciendo que sea más dinámico, incluso instantáneo.

7.3 Gestión del agua

En este campo se pretende trabajar en la parte de captaciones, depósitos, suministros y riegos así:

Depósitos

Integra la elevación de agua programada con los distintos precios y niveles necesarios, control de consumos y tiempos de elevación de las distintas bombas, así como curvas de consumo y sus distintas alarmas sobre las desviaciones de los esperado.

Suministros

Se han instalado contadores de uso final telegestionados, con el objeto realizar las medidas y de controlar los consumos y fugas.

Riego

Se han instalado sensores de humedad que regulan el riegos de jardines públicos en función de las necesidades reales de riego.

ENERINVEST - La Plataforma para la financiación de proyectos de energía sostenible en España.

Muñoz Contreras, María Luz [1] and García Gutiérrez, Fernando [2]

[1] Asociación de Agencias Españolas de Gestión de la Energía, EnerAgen; Universidad de León, León 24008, ESPAÑA
[2] Deloitte Advisory S.L. España

Abstract. La iniciativa ENERINVEST tiene entre sus principales objetivos cubrir la brecha existente entre el sector financiero y el sector de la energía sostenible. Desde su planteamiento como plataforma nacional de referencia para la financiación, se pretende facilitar el encuentro y diálogo entre los diferentes actores involucrados en los proyectos relacionados con las energías renovables y el ahorro energético.
El proyecto contempla investigar sobre modelos innovadores de financiación, presentar y analizar fórmulas novedosas de éxito que aporten soluciones técnicas, financieras y legales a los proyectos promovidos tanto desde el sector público como el privado.
Durante el proyecto se ha desarrollado una herramienta online de asesoramiento y encuentro, que permite a los agentes del sector, promotores e inversores, realizar consultas y encontrar posibles soluciones a las necesidades que se les planteen en materia de financiación. La herramienta ENERINTOOL está integrada y disponible entre las funcionalidades de la plataforma virtual asociada al proyecto, y aporta un asesoramiento técnico, legal y financiero que permite elegir el mejor instrumento de financiación para un proyecto o seleccionar la iniciativa más adecuada en la cual invertir.
ENERINVEST está formado por un consorcio de nueve socios con actuación a nivel nacional y cuenta con un periodo de 36 meses para su desarrollo.

Keywords: energía sostenible, financiación, eficiencia energética.

1 Introducción

El 7 de abril de 2016, se presentó el proyecto ENERINVEST (*Spanish Sustainable Energy Financing Platform*) en una jornada pública celebrada en Madrid. Al evento acudieron representantes de los distintos agentes del sector como: entidades financieras, fondos de inversión, instituciones públicas, agencias de energía, prensa especializada y promotores privados.

ENERINVEST ha recibido el apoyo de la Comisión Europea a través del Programa Horizonte 2020 en virtud del acuerdo de subvención No. 695822. Este programa financia proyectos de investigación e innovación en diversas áreas temáticas en el contexto europeo. En concreto, dentro de los objetivos de la Unión Europea en materia de

"Energía segura, limpia y eficiente", el proyecto ENERINVEST responde al reto de "Mejorar el acceso y el aumento de la financiación así como el atractivo de las inversiones en energía sostenible". Con ello, este proyecto se alinea con los objetivos estratégicos de la Unión Europea en materia energética. Las previsiones de la Comisión Europea pasan por que los objetivos a 2030 puedan llegar a alcanzarse e incluso ir revisándolos al alza en el año 2020. Para conseguir este aumento de objetivos es necesaria la colaboración público-privada en la promoción de proyectos.

Entre los hitos de ENERINVEST está la creación de una plataforma que facilite la inversión en proyectos de energía sostenible, y que sirva de puente para que fluya la información entre iniciativas y posibles inversores. Durante el proyecto se ha desarrollado una herramienta online que permite a los agentes del sector realizar consultas y encontrar posibles soluciones a las necesidades que se les planteen en materia de financiación. Esta herramienta, disponible entre las muchas funcionalidades de la página web asociada al proyecto, contribuirá al buen hacer de la plataforma.

El proyecto ENERINVEST está formado por un consorcio de nueve socios, tendrá una duración de 36 meses, habiendo comenzado en febrero de 2016, y cuenta con una financiación de dos millones de euros por parte del Programa Marco H2020. Dentro del alcance del proyecto se incluye el diseño y organización una convocatoria de premios a iniciativas de financiación innovadoras en España, la coordinación de tres eventos nacionales con el objetivo de reunir a agentes clave en la promoción de proyectos de energía sostenible, así como un evento más en el ámbito europeo.

2 Motivación y objetivos de ENERINVEST.

2.1 Motivación del proyecto.

La viabilidad técnico-económica de los proyectos de energía sostenible es una cuestión de alto interés en España debido a su contribución a reducir la dependencia energética de los combustibles fósiles, a los potenciales ahorros energéticos y económicos que representan estos proyectos, así como al efecto de una reducción de emisiones de CO_2 y un menor impacto ambiental.

Actualmente en España existen numerosos mecanismos para la movilización de fondos que financian proyectos de energías renovables y eficiencia energética. Sin embargo, existen una serie de barreras que impiden un desarrollo mayor de estos proyectos. Entre estos impedimentos pueden citarse: la falta de confianza de los inversores en la viabilidad financiera de los proyectos, la falta de capacidades en el sector público y privado en la estructuración de los proyectos y la falta de difusión de los ejemplos de éxito que motiven y permitan su réplica.

ENERINVEST nace en este contexto para dar respuesta a estas inquietudes y motivar e impulsar la movilización de inversiones en proyectos de energía sostenible.

El planteamiento de base pretende crear una plataforma nacional en materia de financiación para proyectos de eficiencia energética y/o energías renovables que facilite

el diálogo entre los diferentes agentes del sector involucrados en este tipo de proyectos para potenciar su implantación en España, sirva para cubrir las brechas existentes entre el sector financiero y el de los promotores de proyectos, y propicie que se ejecuten una mayor y más eficaz inversión en proyectos de energía sostenible.

2.2 Estado del arte en materia de financiación de proyectos energía sostenible.

La eficiencia energética y el uso sostenible de la energía y los recursos se han convertido en objetivos fundamentales en las políticas gubernamentales, impulsadas por el escenario de aumento de los precios de la energía, la lucha contra el calentamiento global y los objetivos establecidos por la Unión Europea para 2020, 2030 y 2050.

La Directiva 2012/27/UE sobre eficiencia energética vigente en 2016, ha visto reevaluados los objetivos globales a 2030, estableciendo un mayor grado de compromiso y apostando por un sistema energético sostenible, competitivo, seguro y descarbonizado. Adicionalmente, en los dos últimos años el marco de financiación se ha reforzado. Incluir los Fondos Estructurales y de Inversión Europeos y los Fondos Europeos para Inversiones Estratégicas, mejora las condiciones financieras de las inversiones en eficiencia energética en el mercado.

En el momento de preparación de la propuesta de ENERINVEST, 2015, se habían articulado 28.580 millones de euros a través de Fondos Europeos Estructurales para el periodo 2014-2020, con la premisa de darles un uso eficiente (mayor inversión, frente a menores subvenciones) en prioridades como una economía basada en bajas emisiones. En paralelo, la Unión Europea lanzaba líneas de ayudas específicas para proyectos de energía eficiente, como ELENA[1] o PDA[2], junto con diferentes fondos y programas de investigación y desarrollo en tecnologías, como Horizonte 2020.

Sin embargo, existía la preocupación de la falta de inversión privada, unida a que la mayor parte de estos fondos terminaban utilizándose como subvenciones, en vez de desarrollar nuevos instrumentos financieros que podrían resultar en fondos rotatorios para la financiación continuada de proyectos de eficiencia energética.

Un estudio del consorcio europeo EEFIG[3], concluía que la asociación entre instituciones privadas y públicas se hace necesaria para implementar con éxito proyectos de energía sostenible. Las instituciones privadas consideran el préstamo de capital en función de las perspectivas de amortización, evaluando el nivel de riesgo asociado a los proyectos, mientras que, por otro lado, las instituciones públicas centran más su preocupación en el presupuesto total. Por tanto, resulta crucial integrar las diferentes perspectivas del sector público y privado, y adaptar las políticas a ambos lados, [1]. En este sentido, se trabajaba en la creación de una plataforma, constituida por instituciones financieras públicas y privadas, representantes de la industria y otros expertos

[1] ELENA: European Local Energy Assistance.
[2] PDA: Project Development Assistance.
[3] EEFIG: Energy Efficiency Financial Institutions Group, Grupo de Instituciones Financieras para la Eficiencia Energética creado en 2013.

de diferentes sectores de la eficiencia energética, a través de cual poder entablar un diálogo, detectar barreras y contribuir a la mejora de los fundamentos de las inversiones en eficiencia energética en los edificios y los sectores corporativos.

En 2015 en España se disponía de varios mecanismos para la movilización de fondos destinados a financiar proyectos relacionados con la obtención de ahorros de energía y beneficios económicos y ambientales. Estos mecanismos parten de una fuente de financiación local, nacional o supranacional, y a menudo se complementan con la disponibilidad (y aval) de líneas de crédito privadas.

Los socios del proyecto ENERINVEST acumulaban cierta experiencia en la búsqueda de nuevas fórmulas para invertir en eficiencia energética, servicios de asesoramiento financiero, modelos de contratos con garantías en el ahorro de energía, o proyectos de agrupación de pequeñas inversiones para hacerlas financiables. Los proyectos **EESI** (European Energy Service Initiative, 2009-2012), **EUROCONTRACT** (European Platform for the Promotion of EPC, 2007), **COMBINES** (Combining energy services with subsidy schemes to finance energy efficiency in Central Europe, 2012-2014), **MLEI-ACCELERATE** (Movilización de Inversiones Locales de Energía en la provincia de Huelva, 2012-2016) y **GREENER-EX** (Proyecto ELENA en colaboración con el European Investment Bank en Extremadura, iniciado en 2014), son algunos ejemplos.

Además, se analizaron esquemas alternativos de financiación diferentes a las subvenciones o los créditos bancarios, que estaban funcionando con éxito en otros países y aún debían adaptarse a la legislación española. Se destacan el modelo americano **PACE** (Property Assessed Clean Energy) que financia a través de impuestos ligados a la propiedad las inversiones en eficiencia energética en edificios; varias empresas de servicios energéticos públicas en Bélgica o Francia (la red belga **Fedesco**, o el Operador de Servicios Energéticos Regional, **OSER**, en Rhône-Alpes, Francia); y diferentes cooperativas de energías renovables en Europa, representadas en la Federación europea **REScoop.eu**, que les proporciona herramientas, servicios y contactos útiles.

En 2015, la existencia de algunas plataformas de financiación colectiva era una realidad en países como Alemania (Plataforma **Bettervest**) o Reino Unido, y comenzaba a establecerse la Plataforma virtual **Citizenergy**, en la que participan actualmente 18 países europeos para financiar proyectos de energía sostenible de forma colectiva. Esta plataforma pre-selecciona proyectos en busca de financiación para presentarlos a su comunidad de inversores.

En España, se constituye en 2015 una plataforma de financiación colectiva que continúa su actividad en la actualidad y ha servido de ejemplo para otras iniciativas. Se trata de la plataforma para proyectos de inversión en eficiencia energética y energías renovables, **ECrowd! Invest**. Este equipo profesional selecciona proyectos de energía sostenible y realiza una evaluación para comprobar que cuenten con un modelo de negocio probado y maduro, tengan potencial de crecimiento, generen un impacto positivo y medible en la sociedad y el medio ambiente, sin apostar por proyectos especulativos.

En este contexto surge el proyecto ENERINVEST, que planteaba dar asesoramiento a promotores e inversores en energía sostenible, continuar con la investigación de nuevas fórmulas y alternativas de financiación y darlas a conocer mediante una plataforma virtual de contacto entre agentes. Su planteamiento multisectorial y el carácter innovador de la plataforma suponían una novedad en España, lo que llevó a la aprobación final de la propuesta de proyecto y poder ponerlo en marcha en febrero de 2016, con la financiación del programa europeo Horizonte 2020.

2.3 Los objetivos del proyecto.

El objetivo principal de ENERINVEST es el de constituir una plataforma de consulta que aporte soluciones técnicas, legales y financieras a proyectos de energía sostenible desarrollados en el ámbito nacional para fortalecer la confianza entre todas las partes.

Con el desafío de poder dar respuesta a las motivaciones existentes, en ENERINVEST se plantean de manera específica los siguientes objetivos:

- Convertir la plataforma nacional en una referencia en materia de financiación para proyectos de energía sostenible.

- Hacer de nexo de unión entre el sector financiero y el sector de la energía sostenible.

- Impulsar una mayor y más eficaz inversión en proyectos de eficiencia energética y/o energías renovables.

Los informes de evaluación inicial del proyecto de la Unión Europea aludieron a que el enfoque dado por ENERINVEST es "muy creíble", calificándolo como "basado en un análisis exhaustivo de las necesidades del mercado". Estos informes consideraron además que los objetivos resultan razonables y la participación e implicación de los agentes interesados está correctamente dirigida.

3 El consorcio y agentes del proyecto.

La fase preparatoria de la propuesta fue fundamental para definir una estructura de socios coherente, con capacidad operativa en la promoción de proyectos de eficiencia energética y fomento de las fuentes renovables que demanda España desde 2016.

Tras manejar varios esquemas, finalmente, se constituyó un consorcio de nueve socios con actuación a nivel nacional y que representan a distintos agentes presentes en el sector de la energía, tanto desde el sector público como desde las entidades privadas. Se contempló igualmente la representación en diferentes ámbitos territoriales, con socios de competencia provincial, regional y nacional.

En el sector privado se cuenta con una representación nacional de las Empresas de Servicios Energéticos, ESEs, actores clave en la puesta en marcha de proyectos de calidad desde cualquier promotor de energía limpia. Además, para la promoción de

iniciativas se introducen actores como una empresa modelo de consultoría energética y una empresa pública con competencia directa en la gestión y ejecución de proyectos.

La representación del sector público corre a cargo de dos diputaciones provinciales, una agencia de la energía de ámbito regional y la asociación nacional que representa a estas agencias y entidades de gestión de la energía en España.

Del lado de la innovación y cubriendo los aspectos técnicos, se incorpora un centro tecnológico con amplia experiencia en el ámbito de la eficiencia energética y el desarrollo de las energías renovables.

Finalmente, la firma Deloitte Advisory S.L. asume la coordinación del proyecto, valida los trabajos y hace de canal de comunicación esencial con el sector financiero de la energía en España y Europa.

Los nueve promotores de esta iniciativa que trabajarán conjuntamente para conseguir los objetivos del proyecto son: la Asociación de Agencias Españolas de Gestión de la Energía (EnerAgen), la Diputación Provincial de Huelva, el Centro de Investigación de Recursos y Consumos Energéticos (Fundación CIRCE), la Diputación de Gerona, la Agencia Extremeña de la Energía (AGENEX), la consultora EcoServeis, la empresa pública Navarra Suelo y Vivienda (NASUVINSA, S.A.), y la Asociación Española de Empresas de Servicios Energéticos (ANESE).

Este proyecto partió en un principio con el respaldo de más de 30 entidades que mostraron su apoyo a la iniciativa. Durante su desarrollo este número se ha ido incrementando por diferentes canales para contar a finales de Junio de 2018 con más de 1.000 usuarios profesionales.

Con el fin de resolver aquellas cuestiones a las que el consorcio no puede dar una respuesta precisa y se necesita de un asesoramiento especializado, se ha establecido contacto con expertos en el ámbito legal y financiero que colaboran con los socios en grupos de trabajo especializados. Con cierta periodicidad se mantienen reuniones por videoconferencia y presenciales en las que estos grupos valoran y contrastan los trabajos y resultados desarrollados desde ENERINVEST, y trata de promoverse el debate entre agentes para que, de este modo, las sesiones de encuentro puedan aportar conclusiones interesantes en los diagnósticos que el proyecto realiza del marco de la financiación de la energía sostenible en España.

Otra forma de mejorar en ENERINVEST es compartiendo información y experiencias con otras plataformas en el ámbito de la energía sostenible en la Unión Europea. Más de 15 proyectos han prestado su colaboración en la página Web y un buen número de entidades para la financiación de proyectos han solicitado establecer sus enlaces en el sitio virtual **Enlaces de interés de ENERINVEST**.

4 La estrategia de trabajo y el alcance de ENERINVEST.

4.1 La estructura de trabajo.

El modo de conseguir los objetivos propuestos ha sido plantear una estrategia de trabajo multidisciplinar con siete paquetes de tareas, cinco específicos y dos transversales, que se esquematizan en la Figura 1 (ver Fig.1).

Esta definición de trabajos se traduce en la ejecución de las siguientes actividades principales.

En primer lugar, en una labor de búsqueda e investigación documental, se debe recopilar y ordenar información, normativa y esquemas de financiación existentes en España. En esta fase, han sido de gran utilidad las entrevistas y encuentros mantenidos con expertos del sector financiero y con los promotores de proyectos reales de éxito en el entorno de la Unión Europea.

De forma más intensa en un principio, aunque de forma continua durante el proyectos, se ha trabajado para identificar, ilustrar y promocionar casos de financiación innovadores, que han funcionado adecuadamente y que pueden ser considerados como mejores prácticas.



Fig. 1. Esquema representativo de la estrategia de trabajos seguidos en el desarrollo de la plataforma ENERINVEST.

Un hito fundamental en la estrategia ha sido la creación de una plataforma online que reúna de manera estructurada toda esta información, junto con una herramienta informática de soporte y evaluación denominada **ENERINTOOL**.

Esta herramienta virtual permite a los usuarios interesados en la promoción de proyectos de energía sostenible (promotores, entidades financieras o autoridades públicas) realizar una primera evaluación del mercado y de su proyecto que incluye: un testeo de los parámetros técnicos de ahorro y eficiencia energética conseguidos, el planteamiento de tecnologías disponibles alternativas, y el asesoramiento con pro-

puestas de mecanismos de financiación y la información reglamentaria aplicable en cada caso.

Para cubrir las áreas del conocimiento en las que los miembros del consorcio bien necesitan de un asesoramiento externo especializado, o bien han de enfocarse como la suma de aportes de expertos en la materia, se han establecido unos Grupos de Trabajo que en distintas líneas de actuación sean capaces, con sus resultados, de potenciar y fortalecer los mecanismos de financiación de proyectos.

En una plataforma de colaboración y participativa resulta fundamental desarrollar actividades tanto de comunicación e información de la misma, para potenciar su visibilidad, como campañas de divulgación de los resultados del proyecto. En este sentido se han desarrollado infografías, folletos explicativos y videos de formación sobre los contenidos del proyecto.

4.2 El alcance del proyecto.

Del análisis y estudio del panorama nacional en materia de energía sostenible, se ha obtenido una serie de proyectos característicos que están siendo desarrollados para mejorar la eficiencia energética en diferentes áreas que demandan energía. Así mismo, se identifican un gran número de actuaciones para poner en marcha instalaciones que consumen energías renovables en sustitución de fuentes fósiles.

De todos estos ejemplos se ha realizado una caracterización técnica y económica que constituye una base de datos esencial y de referencia en el proyecto ENERINVEST para poder obtener resultados y extraer conclusiones tras los trabajos realizados.

La clasificación de proyectos analizados que se ha establecido en la plataforma contempla 14 tipologías genéricas, con tres niveles de sub-clasificación. De esta forma se llega a dar cobertura a más de 150 casos diferentes de proyectos de energía gestionada de forma eficiente y sostenible.

Los tipos de proyectos contemplados siguen las 14 categorías generales siguientes:

1. Proyectos de rehabilitación de edificios;
2. Sistemas HVAC o sistemas de ventilación, calefacción y aire acondicionado (HVAC - *Heating, Ventilating and Air Conditioning*);
3. Sistemas HVAC con instalación de calderas y redes de distrito;
4. Sistemas HVAC de energía solar térmica;
5. Sistemas HVAC de mejora en los sistemas de distribución del calor o frío;
6. Producción de calor industrial;
7. Iluminación;
8. Equipos e instalaciones eléctricas;
9. Monitorización de instalaciones, contabilización de consumos y gestión energética;
10. Instalaciones de producción eléctrica sostenible, incluyendo una modalidad de autoconsumo;

11. Movilidad sostenible aplicada a vehículos;
12. Infraestructuras y plataformas de movilidad sostenible;
13. Instalaciones de producción de biocombustibles;
14. Otras tipologías de proyectos fuera de esta clasificación.

Dentro del alcance del proyecto está la producción de 40 entregables, de los cuales 16 de ellos serán informes con carácter de divulgación pública, y la puesta en marcha de al menos 3 grupos de trabajo que aborden la problemática Técnica, Legal y Financiera a la que se enfrenta la promoción de este tipo de proyectos.

Hasta el momento en ENERINVEST se han configurado y se está trabajando activamente en tres grupos de expertos. Uno de ellos focalizado en el análisis financiero de los proyectos, otro en la promoción de proyectos de energía sostenible y por último, en base a la experiencia adquirida de los otros dos grupos de trabajo anteriormente mencionados, se constituyó el tercer grupo de trabajo cuyo enfoque es el trabajar recomendaciones políticas en el área de la energía sostenible y su financiamiento asociado, para la definición de una hoja de ruta nacional que mejore la situación de estos sectores y proyectos.

En estos grupos de trabajo, se analizan todas las actividades y resultados de ENERINVEST para obtener una retroalimentación de los agentes interesados, expertos y profesionales. Estas valoraciones se estudian y utilizan para alimentar modificar la versión final de los documentos y recursos publicados.



Fig. 2. Muestra de las reuniones mantenidas con los expertos de los Grupos de Trabajo de ENERINVEST.

5 Los recursos y herramientas generados en ENERINVEST.

Siguiendo la estrategia de trabajo expuesta en el apartado 4.1., los resultados del análisis y estudio se muestran en este proyecto en forma de documentos o informes de síntesis, con la elaboración de fichas virtuales de casos de éxito en la financiación innovadora de proyectos de energía sostenible, o a través de herramientas online, como ocurre con la herramienta ENERINTOOL.

Todos estos recursos se encuentran integrados en la plataforma online de **ENERINVEST** y están disponibles para usuarios registrados. El registro se realiza de forma sencilla y una sola vez por cada usuario, es gratuito y cumple con la nueva legislación de protección oficial de datos. Así, un agente interesado, puede escoger su papel ante un proyecto de energía sostenible y seleccionar entre cinco perfiles diferentes: financiador, promotor público, promotor privado, empresa de servicios energéticos o compañía técnica, y otros interesados.

5.1 Los documentos de análisis y las guías de ENERINVEST.

Las tareas de investigación y análisis del proyecto se han extendido para caracterizar la situación actual en España a la hora de poner en marcha un Proyecto de Energía Sostenible. Como resultado, se han elaborado completos documentos que los usuarios registrados pueden consultar en el apartado de Recursos del portal Web de ENERINVEST [2].

Entre todo el material publicado, resultan de gran interés las siguientes producciones:

- El estudio de los **Aspectos técnicos de los Proyectos de Energía Sostenible (PES)**. Un documento que incluye un contexto tecnológico, la clasificación, definición y caracterización técnica de un amplio abanico de tipologías de proyectos de energía que se albergan bajo el término PES, entendido como intervenciones que directa o indirectamente producen una mejora en el uso de los recursos energéticos. Para cada tipo de proyecto se analiza su viabilidad técnica, tanto en términos de ahorro de energía y reducción de emisiones, como en la cuantificación de los ahorros económicos, [3].
- **El documento Marco de financiación existente en España**. Una recopilación de los modelos financieros que actualmente se aplican a los proyectos de energía, mostrando su evolución y descripción de aspectos relevantes. Para cada modelo se identifican sus principales agentes, parámetros económicos y eficacia, incluyendo esquemas de aclaración y mapas conceptuales con las diferentes alternativas financieras para los destinatarios finales, [4].
- **El Marco legal aplicable en España a PES**. Análisis exhaustivo de las disposiciones normativas y regulaciones técnicas vigentes que serían de aplicación a las modalidades definidas en ENERINVEST como proyectos de energía sostenible. Se incluyen los ámbitos estatal, autonómico y local, contemplando en una segunda parte los esquemas normativos de otros países europeos que podrían ser modelos de referencia replicables en España, [5].

- El **Manual de Buenas Prácticas**, cuyo objetivo principal es mostrar la selección de proyectos de energía sostenible más exitosos, tras el exhaustivo análisis técnico, legal y financiero realizado por los socios del proyecto ENERINVEST. Se recogen un grupo representativo de PES, ejecutados y financiados por métodos tradicionales en el ámbito nacional. Esta recopilación de experiencias exitosas en distintas tipologías de proyectos pretende servir de referente a futuros promotores, así como facilitar la toma de decisiones en cuanto a la financiación y ejecución de los mismos, [6].

5.2 La Guía para la Financiación de Proyectos de Energía Sostenible de ENERINVEST.

A mediados de 2017 se publica la *Guía para la Financiación de Proyectos de Energía Sostenible*, un compendio dinámico de información esencial para inversores y promotores interesados en poner en marcha este tipo de proyectos, [7].

El documento surge como una herramienta de acercamiento entre promotores e inversores y empresarios e instituciones, en respuesta a la necesidad de facilitar la comprensión mutua de ambos sectores para estimular el desarrollo de nuevos proyectos de energía sostenible.

En concreto, la guía presenta en detalle los diferentes tipos de financiación existentes y sus implicaciones, así como las claves para la elección de la estrategia y los instrumentos más adecuados según las características de cada proyecto. Se incluyen asimismo los parámetros esenciales a valorar a la hora de invertir en proyectos de energía sostenible, además de enumerar los períodos habituales de retorno de la inversión en función del tipo de proyecto.

También ocupan un apartado especial las garantías y los riesgos a tener en cuenta al momento de poner en marcha una iniciativa de energía sostenible.

Para la elaboración de esta Guía se ha contado con la colaboración de varias empresas e instituciones que representan tanto a promotores de proyectos como a financiadores.

5.3 El Mapa de Experiencias de ENERINVEST.

La información recopilada de la investigación en modelos financieros que introducen la innovación en alguno de sus parámetros, se ha integrado en la plataforma de ENERINVEST en la forma de un mapa de navegación denominado *Mapa de Experiencias*, que está a disposición de los usuarios registrados, [8].

Esta herramienta recoge casos de éxito, proyectos y modelos de financiación innovadores desarrollados en España y el resto de Europa. Se trata de uno de los **recursos interactivos** diseñados para facilitar el acercamiento entre el sector financiero y el de las energías sostenibles.



Fig. 3. Muestra del *Mapa de Experiencias* en la Plataforma ENERINVEST.

El *Mapa de Experiencias* abarca a día de hoy más de 50 casos, clasificados según tres categorías principales:

- **Los instrumentos financieros innovadores**, donde se muestran modelos de financiación adaptados a las características generales de los proyectos de energía sostenible. Se contemplan ejemplos de fondos de inversión y fondos rotatorios especializados, ESEs públicas o semipúblicas, casos de financiación colectiva y modelos de cooperativas energéticas, entre otros.
- **Los instrumentos de estandarización y apoyo a los proyectos**, con iniciativas y estrategias para normalizar los procedimientos de inversión y ofrecer servicios de apoyo técnico o financiero.
- **Los instrumentos específicos según tecnologías**, que incluyen modelos de financiación diferenciados según las características de los proyectos vinculados a tecnologías específicas. Se encuentran ejemplos aplicados a la rehabilitación energética de edificios y a la financiación de energía solar fotovoltaica.

5.4 La herramienta de simulación, asesoramiento y encuentro, ENERINTOOL.

Entre los materiales elaborados dentro del proyecto, la herramienta que introduce la mayor originalidad como recurso interactivo integrado en la plataforma es la denominada ENERINTOOL, [9]. Este trabajo ha sido coordinado por la Fundación CIRCE.

Se trata de una herramienta virtual de asesoramiento, elaborada para permitir que cada usuario encuentre la **mejor forma de financiación** para un proyecto de energía sostenible, o bien **el proyecto en el cual invertir**. Además, aporta una serie de recomendaciones en aspectos financieros, técnicos y legales, que ayudan a llevar a cabo proyectos de energía eficiente y/o renovable con éxito.

La herramienta tiene un fácil manejo y está basada en una amplia base de datos de proyectos reales de los que se conocen resultados energéticos, ahorros económicos y

datos de reducción en el volumen de emisiones de CO_2, entre otros parámetros técnicos y financieros.

ENERINTOOL da soporte tanto a los promotores en la búsqueda de alternativas de financiación, como a entidades bancarias, fondos de capital y otros inversores en busca de proyectos que cumplan con ciertas características para financiar.

Para utilizar este recurso, el primer paso será formalizar el registro gratuito en la plataforma digital ENERINVEST escogiendo el perfil que mejor se ajuste a su desempeño y relación con los proyectos de energía. Como usuario registrado se puede acceder rápidamente a ENERINTOOL y recibir un **asesoramiento** adaptado a diferentes proyectos y alternativas de inversión. Se aportan **soluciones** técnicas, legales y diferentes opciones de financiación, tanto a promotores como a inversores, permitiendo además ponerse en **contacto** con aquellas partes que encuentren afinidad e interés en una iniciativa común de proyecto de energía.

En la práctica, la interfaz de la herramienta se ha diseñado para poder acceder desde los dos modos habituales de afrontar un proyecto, es decir, como promotor en el "Modo ENER", o en el papel de financiador, en el "Modo INVEST".

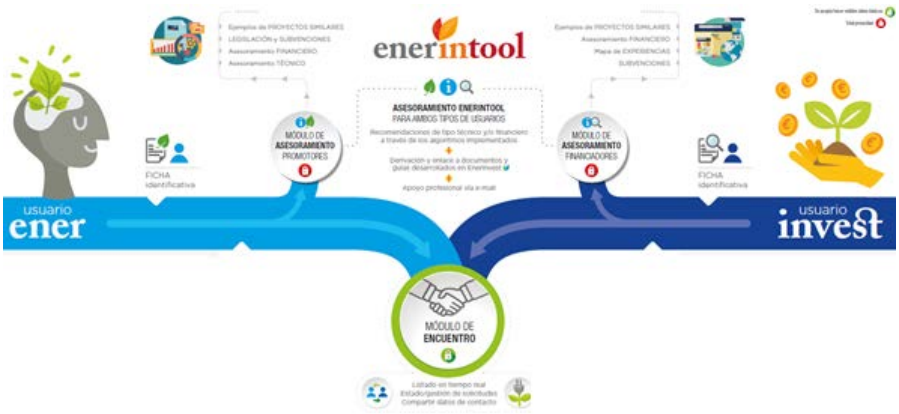


Fig. 4. Infografía de la herramienta ENERINTOOL.

Al acceder con un perfil de **promotor de proyectos** (modo **ENER**), **ENERINTOOL** ofrece una clasificación de 14 proyectos diferentes que permiten identificar una iniciativa y completar un formulario adaptado con información específica sobre parámetros técnicos y económicos.

La herramienta va guiando en este proceso y aporta instrucciones en cada momento. Como resultado, recibirá un informe de asesoramiento sobre los instrumentos de financiación más recomendables, junto con ejemplos de proyectos similares, la legislación aplicable y ayuda para la búsqueda de subvenciones.

Cada usuario puede crear y dar de alta tantos proyectos como desee, e incluso agruparlos para buscar financiación conjunta.

El uso de la herramienta como **inversor** (modo **INVEST**) es igualmente intuitivo, aunque dirigido a definir unos parámetros técnicos y económicos de búsqueda que pueden llevar a seleccionar los proyectos de energía más interesantes para estos agentes.

Se pueden **generar diferentes búsquedas** para encontrar proyectos en los cuales invertir, así como información sobre las alternativas de financiación más innovadoras y las subvenciones que son de aplicación en cada momento.

Un financiador puede crear tantas búsquedas como desee, con dos o más criterios y en distintos niveles de concreción, pudiendo encontrar proyectos por tecnologías, e incluso, grupos de proyectos en los que invertir.

Una funcionalidad original de ENERINTOOL: el Módulo de Encuentro

Entre las funcionalidades de la herramienta no está únicamente la de asesorar a los usuarios. En el llamado **Módulo de Encuentro**, inversores y promotores de proyectos pueden establecer vínculos después de aceptar solicitudes mutuas de contacto, generadas a partir de criterios de búsqueda coincidentes. De esta forma, ENERINTOOL permite dar un paso más allá en la puesta en marcha de iniciativas sostenibles.

Como material de refuerzo se han publicado una *Guía de apoyo para la búsqueda de ayudas y subvenciones* a través de la ENERINTOOL [10], y una Guía que facilita la búsqueda de proyectos o casos de éxito a través de la herramienta [11].

Adicionalmente, ENERINTOOL permite alimentar continuamente su base de datos con nuevos proyectos, que cualquier usuario registrado puede presentar y autorizar para ser visualizados por todos los usuarios, con la validación previa del consorcio de ENERINVEST.

6 Los resultados y previsiones de impacto.

Los **resultados** de ENERINVEST en términos de productos conseguidos se identifican con los recursos, documentos y herramientas que se han ido generando en las actividades del proyecto (apartado 5). Hasta febrero de 2019 se continúa trabajando en una base de datos de agentes clave en la financiación de energía sostenible, en la promoción de proyectos y en la búsqueda de contactos e interacciones positivas e innovadoras entre el sector financiero y/o de inversión y las iniciativas en energía eficiente.

En cuanto a la valoración de los **impactos** se ha de tener en cuenta que, para los proyectos de estas características en el Programa Horizonte 2020, suele ser inicialmente ambiciosa en términos cuantitativos. Sin embargo, a medida que se completan las actividades pueden existir reorientaciones y cambios en la interpretación de los logros realizados.

Los múltiples beneficios que aporta la eficiencia energética han sido reconocidos, destacando la reducción de la dependencia de las importaciones de energía. Se trata

de un planteamiento de consumo de energía competitivo, rentable y ampliamente disponible, motivo por el que se ha considerado como un recurso energético.

Por este motivo, la plataforma ENERINVEST busca ayudar al impulso de actuaciones de eficiencia energética reduciendo la incertidumbre en la sociedad inversora, mejorando la estandarización de inversiones y el establecimiento de estrategias o mecanismos de financiación.

Con todo ello, en los planteamientos iniciales en términos de energía e inversión (impacto alineado con los objetivos de la Comisión Europea) la plataforma virtual pretende reducir el consumo de energía en 29,6 GWh/año y tener una nueva producción de energía a partir de fuentes de energía renovables de alrededor de 28,4 GWh/año, lo que conlleva a movilizar alrededor de 25 millones de euros promoviendo más de 400 proyectos de energía sostenible.

Para la obtención de estos resultados, se estima sumar unas 100.000 visitas a la plataforma virtual y página Web, y generar influencia en unas 10.000 personas que hayan participado en actividades de ENERINVEST.

Los resultados actuales de la plataforma se resumen en los recursos anteriormente introducidos, los cuales se cuantificarán en términos de ahorro de energía e inversión durante los primeros meses de 2019.

Finalmente, uno de los resultados a destacar, ya que cumple con uno de los objetivos de partida, es la creación de una **red de contactos y colaboración con otras plataformas** e iniciativas para la financiación y mejora de los proyectos de energía sostenible que han surgido en España y Europa desde 2016. Algunos de los ejemplos se recogen en la sección *Proyectos Relacionados* de la Web de ENERINVEST, [12]. Existen casos concretos como las plataformas europeas **SEFIPA** (Sustainable Energy Financing Platform), **SEAF** (Sustainable Energy Assets Platform), **EPC Plus** (Energy Performance Contracting Plus) y **DEEP** (De-Risking Energy Efficiency Platform), cuyos objetivos y actividades guardan relación con parte de los desarrollados en ENERINVEST, [13], [14], [15], [16]. El contacto y conexión con estos proyectos está permitiendo intercambiar experiencias, así como enriquecer mutuamente los trabajos para fomentar la inversión en energía eficiente y renovable en España y Europa.

Referencias:

1. Energy Efficiency Financial Institutions Group, EEFIG.: Energy Efficiency - The first fuel for the EU Economy (2015); LNCS http://eefig.eu/index.php/the-eefig-report ; último acceso 2018/09/08.
2. LNCS Apartado de Recursos / Documentos del portal Web de ENERINVEST, https://www.enerinvest.es/recursos/documentos ; último acceso 2018/07/14.
3. LNCS ENERINVEST - Aspectos técnicos de Proyectos de Energía Sostenible en España, https://www.enerinvest.es/recursos/documentos ; último acceso 2018/07/14.
4. LNCS ENERINVEST - Marco de Financiación existente en España para Proyectos de Energía Sostenible, https://www.enerinvest.es/recursos/documentos ; último acceso 2018/07/14.

5. LNCS - Marco legal existente en España para los proyectos de energía sostenible, https://www.enerinvest.es/recursos/documentos ; último acceso 2018/07/14.
6. LNCS - Manual de Buenas Prácticas, https://www.enerinvest.es/recursos/documentos ; último acceso 2018/07/14.
7. LNCS - Guía para la financiación de Proyectos de Energía Sostenible, https://www.enerinvest.es/recursos/documentos ; último acceso 2018/07/14.
8. LNCS - Mapa de Experiencias, https://www.enerinvest.es/recursos/mapa-de-experiencias ; último acceso 2018/07/14.
9. LNCS - ENERINTOOL, https://www.enerinvest.es/recursos/enerintool ; último acceso 2018/07/14.
10. LNCS - Guía de apoyo para la búsqueda de subvenciones en la ENERINTOOL, https://www.enerinvest.es/recursos/documentos ; último acceso 2018/07/14.
11. LNCS - Guía de apoyo para la búsqueda de proyectos/casos de éxito en la ENERINTOOL, https://www.enerinvest.es/recursos/documentos ; último acceso 2018/07/14.
12. LNCS - Subapartado Proyectos Relacionados en la Web ENERINVEST, https://www.enerinvest.es/recursos/proyectos-relacionados ; último acceso 2018/09/07.
13. LNCS - SEFIPA, https://www.sefipa.at/en/about-sefipa ; último acceso 2018/09/08.
14. LNCS - SEAF, https://www.seaf-h2020.eu/project-overview/mission/ ; último acceso 2018/09/08.
15. LNCS - EPC Plus, http://spain.epcplus.org/plataforma-epc/ ; último acceso 2018/09/08.
16. LNCS - DEEP, https://deep.eefig.eu/ ; último acceso 2018/09/08.

UCO Smart Campus, an intelligent environment for the university community

Rodríguez-Cantalejo, R. D. [1][0000-0003-3729-1481] ; Redel-Macías, M.D.[1] ; Cubero-Atienza, F. J.[1] and Vázquez-Serrano, F. [1]

[1] Universidad de Córdoba, Córdoba 14071, Spain
drodriguez@uco.es

Abstract. This work shows the important improvement obtained in the technical management of the infrastructures of the University Campus of Rabanales belonging to the University of Córdoba, a scientific and technical agricultural university space located on the outskirts of the Cordoba. There are almost nine thousand inhabitants developing their activities in different buildings for teaching, administrative, research, residential and commercial use as well as agricultural environments and livestock sheds for research purposes. The supervision of the systems as electricity, water, gas, air conditioner, for the whole Rabanales Campus, together with the individual technical management systems of each building is integrated in a supervision system based on open standards and with a flexible structure, improving the efficient management of infrastructures and giving the support of the entire university community.

Keywords: Smart Campus, infrastructures, efficient management.

1 Introduction

1.1 Smart City

Smart City means the adoption of a city model with a long-term vision and the commitment to be more efficient, productive, sustainable and habitable [1]. This is necessary to use and implement global inmotic systems due to the immediate need for a rational consumption of energy, a transparent and effective administration of public resources applied both in the field of new urban environments but especially in existing environments. These systems allow us to obtain a constant feedback of information in order to analyze the functional and energetic behavior of buildings and common facilities in single administration environments.

1.2 University of Córdoba like a Smart Campus

The University of Córdoba has been investing in human and material resources in recent years to improve its existing infrastructures.

A teaching environment that goes from the Humanities and the Legal-Social Sciences,

to the Health Sciences and the Scientific-Technical careers, areas that correspond to its structuring in the different Campus: Campus Center, Campus Menéndez Pidal and University Campus of Rabanales. In addition, the UCO has another University Campus in which is located the Higher Polytechnic School of Belmez, located sixty kilometers from the capital of Cordoba. The campuses make up around seventy buildings or services to be managed. In Fig. 1, shows a distribution of the buildings and services of the UCO of its different campuses in the city of Córdoba, concentrating the greater number of them in the University Campus of Rabanales.

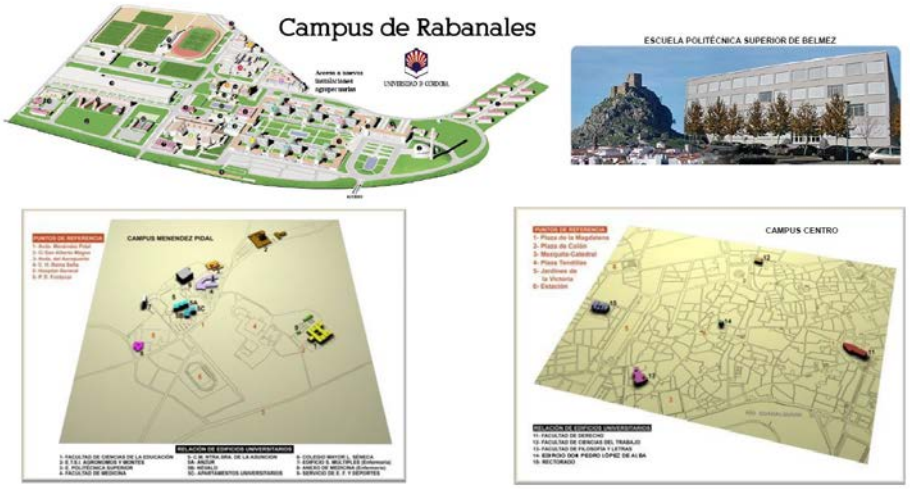


Fig. 1. Campus buildings at the University of Córdoba

The Engineering Office of University of Cordoba depending on the Vice-Rectorate for Infrastructure and Sustainability and the General Campus Coordination, develops the university's policy on facilities, works and communications as well as technical management of maintenance, giving opportunities to the present and future needs of the university community.

The present work is focused in the Rabanales University Campus, at three kilometers from the city of Córdoba, national road IV km 396. This is a teaching environment of an agro-food, scientific and technical nature; which includes buildings and spaces for teaching, administrative, research, residential, commercial, sports as well as agricultural environments and livestock buildings for research purposes. The infrastructures presents its last relevant renovations including the building and facilities in the period between 1994 and 2003.

The University of Cordoba has agreements for the different facilities such as supply of natural gas, electricity (high voltage) and water. However, the responsibility of the maintenance of these services is from University. In fact, last couple of years being

billed respectively on the basis of a single measurement equipment from electricity, gas or water company. Therefore, this is important to establish and maintain its own drinking water distribution network and pumping station and its own high voltage network, transformation centers and low voltage network to each building and service. In many case, thes problem with the services that user could have should be solve by the own University.

With respect to the human resources, the University has an important active population, almost twenty thousand users, all of them from different profiles and needs finding teaching and research staff, administration and services staff, students and regular external personnel (maintenance contracts, reprography , coffee shops, banks, technology-based companies, etc.). Presenting each group of users different needs in the use of the facilities.

The diversity of existing spaces and areas, where the research infrastructure plays a leading role, makes the maintenance and monitoring of the behavior of facilities and control of supplies presently vital and critical.

1.3 Problem description

The main problems that have been found in the infrastructures of the university are the following:

- The only measure of supplies is provided by the companies supplied on a monthly consumption, not being able to analyze the behavior of buildings and services on a daily consumption, such as reactive consumption, demand peaks, water leaks, etc. This problem is accused in the Rabanales Campus, where the greatest number of buildings and services are located, as it has a single supply for high voltage and a single water supply. Moreover, the distribution network in high voltage and low voltage transformer centers of each building as well as the accumulation of drinking water in cisterns, pumping stations and distribution network is the responsibility of the university itself. Therefore, this hinders the analysis of the conditions as well as to know what happens inside the Campus with the aim to propose the appropriate technical management.
- Limited existence of automatic control in general installations such as exterior and interior lighting of buildings or lighting of chillers and boilers. This implies a dependence on the human factor or basic time clocks that do not adjust to an adequate management of energy saving, considering real occupation needs, existence of natural light, holidays, interchange of production equipment, etc.
- Much of these infrastructures in the Campus correspond to research and experimentation. The lack of incident alarms and their communication in certain critical facilities such as cold rooms, animal houses, greenhouses, data processing centers, drinking water pumping stations or compressed air causes an economic loss, of invested time and results in many cases incalculable.

- The existing automated facilities, mostly air conditioning, use proprietary control systems that prevent integration of the different facilities in a central technical management system and generate a dependency on each manufacturer.
- The facilities lack a supervision system that integrates the different infrastructures and manages their current status, parameter trends, alarm history and sending reports and incidents. This implies a deficient technical management of buildings and a permanent displacement of technical staff.
- The university community does not know the real consumption of its facilities or services in its day to day, which does not favor the awareness and collaboration of sustainability and energy saving matters.

There is a limited existence of control elements that manage the facilities, such as programming of on and off, consumption records (electricity, water, etc), remote supervision, immediate warning of failures or inadequate conditions and especially the integration of the different facilities that coexist in the buildings of the campus.

In this sense, the Technical Office are the establishment of the necessary requirements for short-medium term giving the correct technical management of its buildings, including an economic saving of its management as well as an increase in the satisfaction of the members of the university community and the productivity of the facilities.

The rest of this paper is structured as follows. Section II presents some of the most relevant works related to applications in SmartCampus infrastructures. The proposed architecture is discussed in Section III where the details about how the SDN and our network is implemented, are also shown. Measurement results are shown in Section IV. Finally, Section V presents the conclusion and future work.

2 State of art

In recent years, several researches have worked on the development of smartcities in their different services such as urban mobility, energy efficiency and environment, government and citizenship, public safety, health, education, e-commerce, human capital and culture. If we focus on the concept of space capable of listening and understanding what happens in a community to make the best decisions and provide the best services to users, some works can be highlighted focusing on university campuses as environments that show the same challenges as a city but on a smaller scale, are the so-called SmartCampus.
Also, a university campus can be considered as a bank of trials before to implement the system in a smart city. For these reasons, some cities as Santander [2] or Málaga [3] in Spain have become smart cities from public administrations as University or companies as Telefónica [4] or IBM [5]. With this kind of systems, one of the main challenges is the information processing so Khabou *et al* [6] highlighted the importance of analyzing the collected context parameters to detect the appropriate adaptation actions. They proposed a threshold comparison technique analysis to detect changes which could be fixed, adaptive and step function and having the possibility to

plan the future strategies of control. At University of Brescia has proposed different activities addressing the Smart Campus such as the reduction of energy consumption (i.e. heating, cooling and ventilation, lighting and electric equipment) and Smart Automation [7]. The authors evaluated the energy reduction through envelope renovation and renewable energy production to pursue an energy balance between generation and consumption. Trilles *et al* [8] presents how to embed an open sensorized platform for both hardware and software in the context of a smart campus. This work is focused on a network of different sensorized platform inside university inside university with the aim of monitoring the environmental phenomena. Other researches are related to the internet data traffic generated in a smart university campus. In this sense, Oluwaseun *et al* [9] did a statistical study across the 12 – month period developing an empirical model for optimal quality of service, internet traffic forecasting and budgeting. Other paper related to smart university campus focuses their researches on energy consumption [10]. Thus, the total amount of electricity consumed at Convenant University, Ota, Nigeria was measured, monitored and recorded for a period of 12 months with the aim to plan new policies and strategies improving the efficiency.
In Spain, the number of smart universities that have joined to this kind of initiatives has increased last years (Universidad de Málaga [11], Universidad de Alicante [12], Universidad Jaume I [13] or Universidad de Zaragoza [14] among other) showing the importance of the integration of different systems, analysis of data and the planning of the control actions.

3 Description of the solution and methodology

Satisfying the proposed objectives, the Technical Office during several years has been posing as a basic infrastructure the use of a flexible control and automation system, governed by open and standardized communication protocols so that both software and hardware can integrate into an only platform, present and future systems regardless of the manufacturer. In this way, a closed system is avoided that forces to be subject to a single manufacturer for life or the inability to integrate. This is something that the university has been suffering in various existing facilities on other Campus.

The proposed system consists in using the powerful local intranet that communicates all the buildings and services in optical fiber, managed by the computer service of the University itself as a trunk that communicates the different inmotic systems based on field buses with distributed control. In Fig. 2, the architecture of the intranet UCO and online traffic web is detailed.

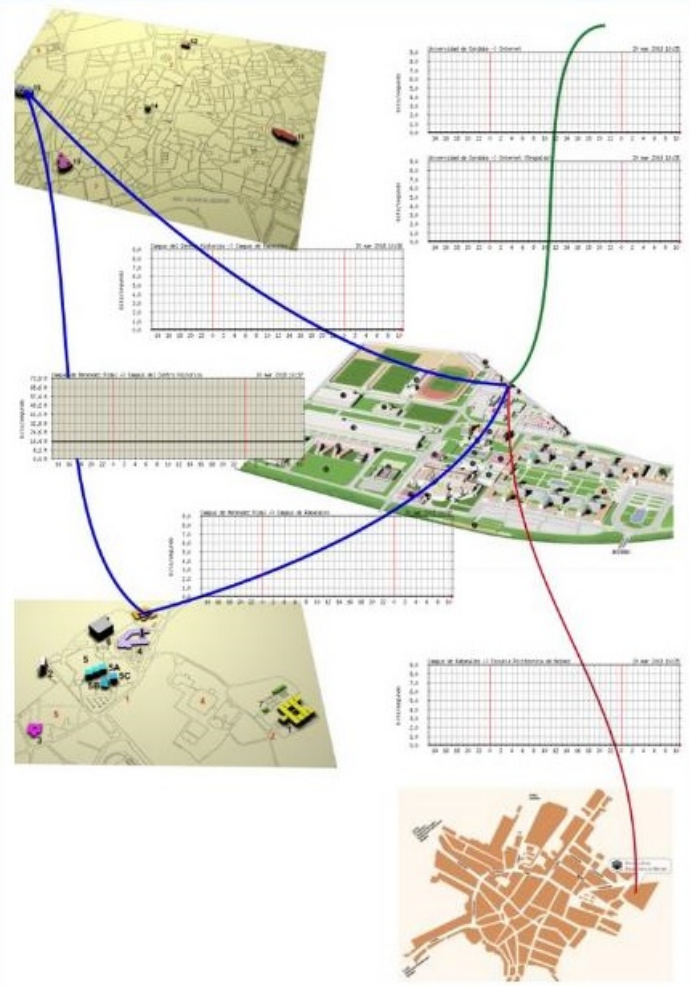


Fig. 2. Local Network TCP / IP UCO. Online traffic statistics, UCO Computing Service [15]

The main platform used is LonWorks, LON (Local Operating NetWork), based on the use of the Lontalk protocol (ANSI / EIA 709) for control networks, which implements the seven layers of the OSI (Open System Interconnection) model [16]. LON is the basis for an open and interoperable system in which the products and solutions of leading companies in the world come together in a simple and simple implementation that integrates several components of the system in a complete solution.

The basic premise is to facilitate the need to integrate multiple components of the system with a common systems and infrastructure architecture, which in essence is a set of cables through which all components are linked and can share common information. The data can travel from any point of the network to any other point without

any failure, incorporating high levels of security and allowing the interoperability of complete components from user to user.

As a secondary platform, but integrated with the first one, the Modbus TCP / IP protocol is proposed, basically to cover the communication with electrical measurement centers and isolated controllers, since the majority of equipment manufacturers incorporate it as standard without additional economic cost. Modbus is a communications protocol located at level 7 of the OSI model, based on the Master/Slave or Client/Server architecture, designed in 1979 by Modicon for its range of programmable logic controllers (PLCs). Developed into a standard communications protocol in the industry, it is the one with the greatest availability for the connection of industrial electronic devices because it is public, its implementation is easy and requires little development and manages blocks of data without supposing restrictions allowing control of a network.

Other bus platforrm, KNX, standard protocol (ISO / IEC 14543-3), based on OSI model, for control of the different building subsystems. Employee in the UCO for the complete management of the Faculty of Medicine and Nursing and combined with the DALI protocol for lighting control in the IMIBIC building and the Vial Norte building. BACnet IP (Building Automation and Control Networks), standard protocol (ISO 16484-5). Based on OSI model, for control of HVAC systems fundamentally. Employee in the UCO for climate equipment controllers Biomodule P2 Service Animal Experimentation equipment climate building Vial Norte.

In an upper communication layer, the Ethernet platform is used, taking advantage of the extensive infrastructure, as we have already mentioned, of structured twisted pair wiring, wifi and optical fiber available in buildings and between them, behaving like a large local network.

The control installation presents each building and service as an isolate within the campus in terms of control and supervision with open and flexible technology, giving it its own autonomy. The controlled facilities are diverse and non-uniform in each building and service since, thanks to their flexibility and capacity for expansion, they have been particularized according to the immediate needs and the available economic resources. Among the controlled installations we can highlight the lighting of common areas (on / off of luminaires, time schedule of ignitions, etc.) energy management by means of power network analyzers (visualization and recording of main electrical parameters), potable water pumping station (status of pumps and frequency variators, water level, maintenance of constant pressure according to demand, instantaneous and accumulated flow) and general distribution network (pressure and flow), air conditioning (on / off, display and temperature record of zones), heating (on / off, visualization and recording of temperature of zones), compressed air station for laboratories (state of compressors, room ventilation, pressure and flow supplied) and administrative management (communication of incidents, notices of periodic reviews , etc). One of the most outstanding aspects consists of the supervision of the refrigera-

tion chambers and equipment, a type of critical installation both for its number (with more than a hundred installations) and for its level of safety, since in many cases they host experimental activities.

For each building, several buses are installed, LON (LPT-10 and FTT-10A) and Modbus TCP / IP, KNX, Bacnet IP, among others, with bus topology establishing a multi-brand installation. In Fig. 3, the architecture of the system in each building is detailed. The communication between the modules is based on the standard. Each building has its own main controller with scada web y it behaves like an autonomous system.

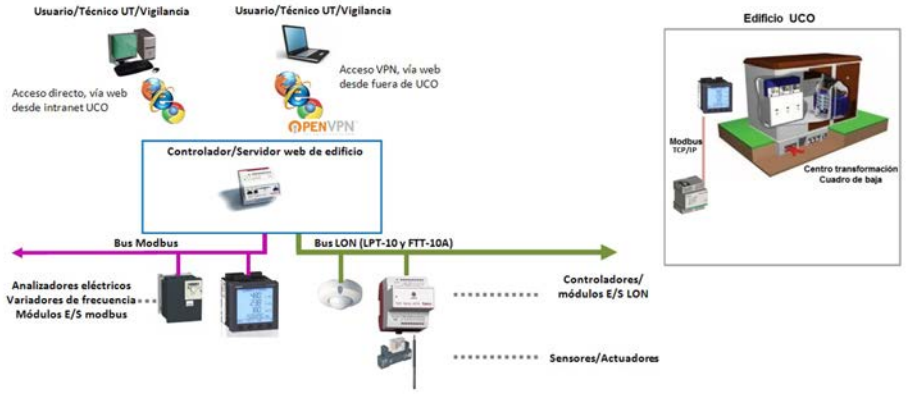


Fig. 3. Diagram type of building control

Each building or RTU (Remote Terminal Unit) is interconnected by Ethernet protocol through a higher level software application performing the tasks of central control unit or MTU (Master Terminal Unit). This application runs on a redundant server located in the data processing Centre in the Rabanales Campus, providing maximum maintenance security hardware with cyclic backups, room temperature and humidity control, access control and 24-hour all year. From the application the bus networks of the different buildings are managed and presents a general SCADA to supervise the total of the buildings and services registering general alarms, variables of interest in a redundant way for the generation of curves or reports of building behavior , graphic screens by nature of facilities, user management, among others. In Fig. 4, the general network architecture between buildings based on TCP/IP protocol is detailed.

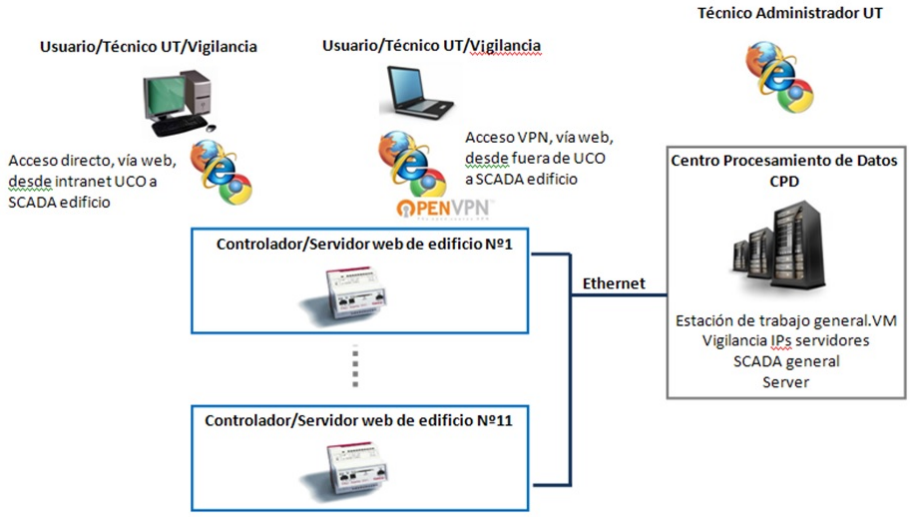


Fig. 4. The general control scheme on campus.

With the existence of different protocols, the automation needs are covered through the use of controllers, input / output modules and intelligent sensors, providing the installation of a distributed character inside the building. The buses are conected in a computer with web server that provides the installation of a SCADA system (Supervisory Control And Data Acquisition) [17] multiuser accessible from any internet browser via Ethernet for supervision as a user or for computer programming tasks or application as administrator or engineering. In the SCADA, the graphic screens of facilities, user control, alarm management with sending emails, variable registers and trend curves are presented. The registered data can be provided in files with CSV format (Comma Separated Values) giving the possibility of being visualized and treated by external systems. The Fig. 5, shows images both of main SCADA of campus and secondary SCADA of different buildings.

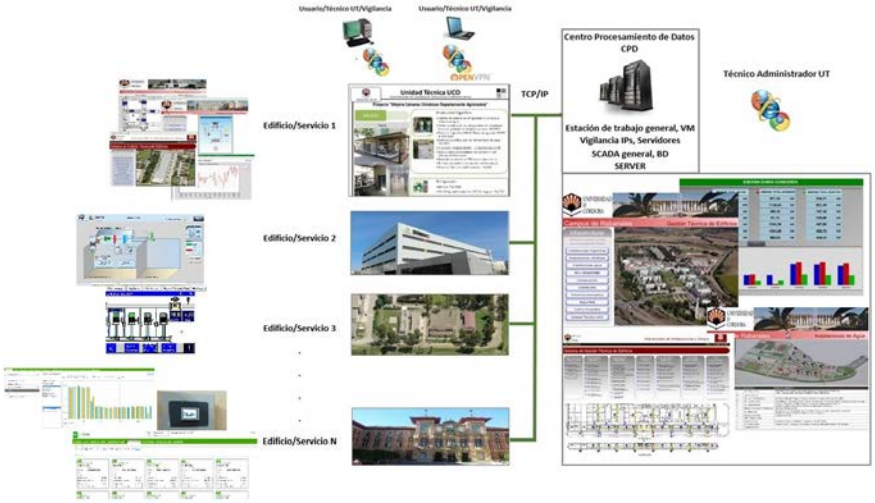


Fig. 5. SCADA UCO Smart Campus

4 RESULTS OBTAINED AND DISCUSSION

With the implemented system a remarkable improvement in the administration and technical management of the infrastructures is achieved, highlighting the following topics of interest:

Maintenance of Facilities and Infrastructure. The present and future needs of the facilities and users are met by developing a system with a flexible structure that improves Campus functionality. This offers a modular distributed control that guarantees a greater comfort and safety of users with the control of the operating variables. The notice and planning of maintenance tasks offers the non-interruption of work with the other companies working both of the changes and modifications. Technological Technical means based on open systems are available with the possibility of proposing the present and future installation with different product manufacturers that support the contemplated standards. The normal operation of the facilities is automated, avoiding the human factor for routine tasks (turning on and off daily, scheduling holidays, monitoring anomalous situations, etc.). Different common facilities of the buildings and services are integrated under a same platform so that they can exchange information between them. Communication is guaranteed to the different people responsible for unwanted states and breakdowns. The contribution of registration data in open CSV format makes the proposed solution behave as an Open Data architecture contributing data to third parties such as the case of Energy Service Companies (ESEs). Figs. 6 and 7, show how can be displayed the parameters in real time both per building and several ones. The technical staff can observe in real time parameters checking anomalous states of campus infrastructure.

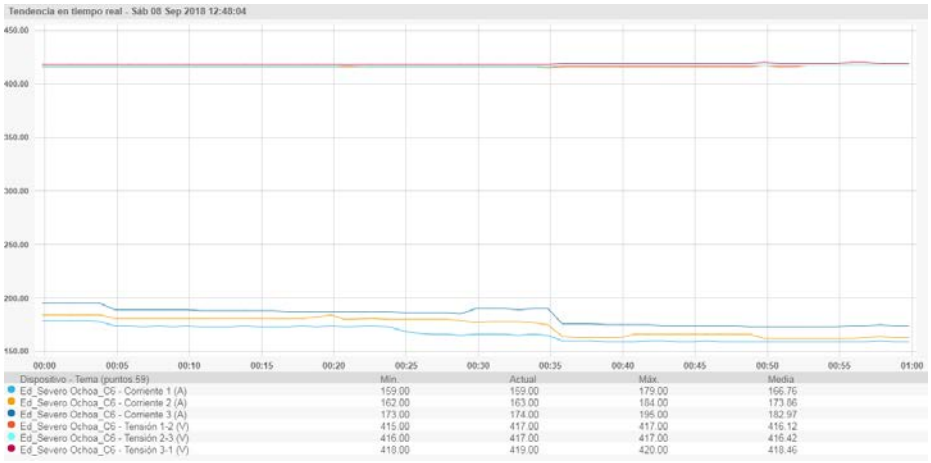


Fig. 6. Parameters in real time in a building

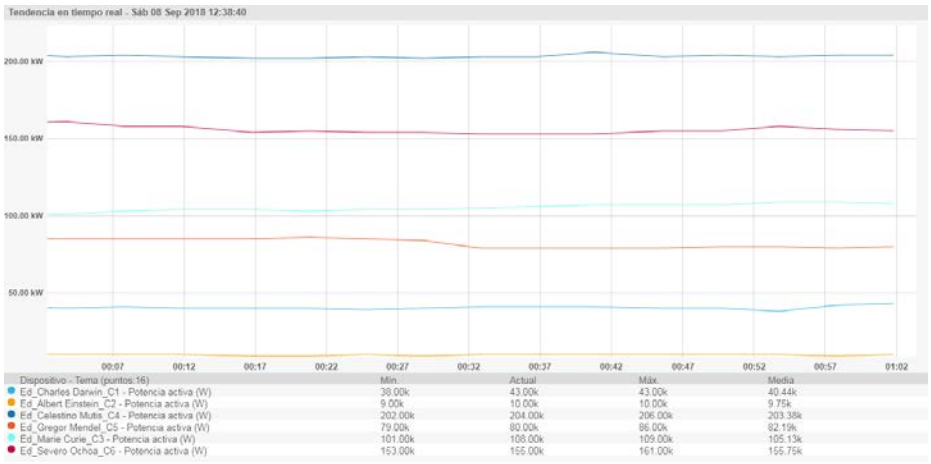


Fig. 7. Parameters in real time in several building

Environmental. Energy savings are favored thanks to the management and permanent analysis of the main electrical parameters and behavior of facilities. In Fig. 8 and 9, the the behavior of the demand of users for two buildings of example is detailed. Historical energy describes the behavior of each building. You can see the difference between a building dedicated to research (Fig.8, Severo Ochoa building) and an administrative management building (Fig 9, Government building). The first building maintains a uniform consumption regardless of holidays or weekends while the second building shows a clear variation between working days and holidays. We can

determine by building occupation, importance of infrastructure, night minimum consumption or maximum peak time throughout the campus for an academic year.

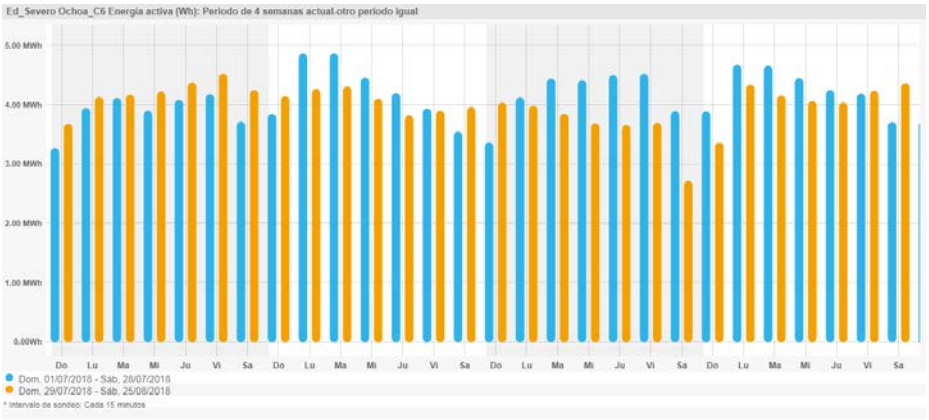


Fig. 8. Daily electric power consumption in research building (4 week)

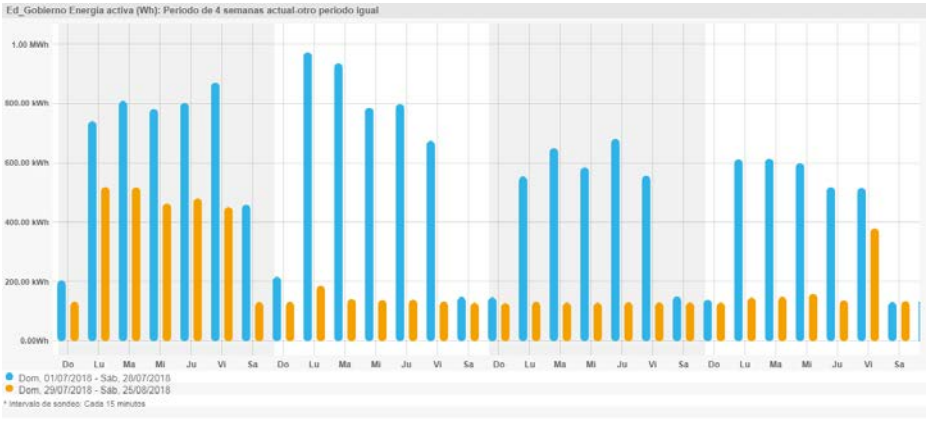


Fig. 9. Daily electric power consumption in administrative management building (4 week)

The reduction of CO_2 emissions is achieved by reducing the unnecessary operation times of equipment and installations as well as the detection of anomalous behaviors that imply inadequate consumption or quality of supply. The Fig. 10, shows the evolution total carbon footprint in the UCO, obtained from last annual report of the Environmental Protection Service of the UCO [18], the red bar being last year analized.

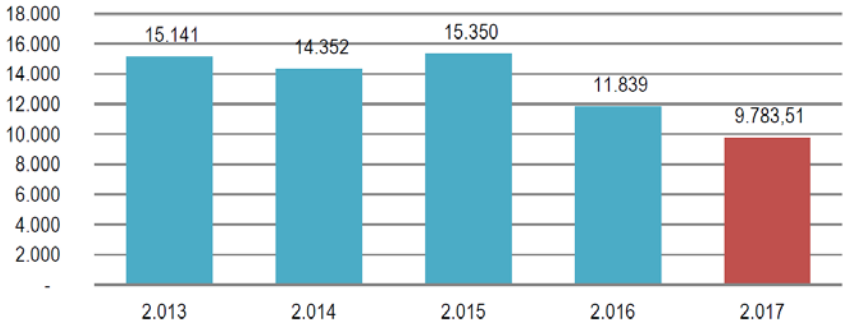


Fig. 10. Evolution total carbon footprint in the UCO (ton CO_2)

Economic / social. Operating and maintenance costs are reduced by automatically posting hours of equipment operation and warning of anomalous operating conditions, which in turn have an increase in the useful life of the services. The satisfaction of the user increases seeing how the facilities are adapted to their needs. Therefore, the Public Administration have a useful tool to sensitize all members of the university community in terms of sustainability through the possibility of showing via web the main energy and consumption data. It should be noted that the corporate image of the University, as a public entity, is reinforced by showing a special interest in providing its infrastructure with a system aimed at improving energy efficiency and sustainability.

5 CONCLUSIONS

The use of new technologies of automation and communications in a comprehensive technical management platform applied to our university public complex, is confirmed as an essential tool to assess the state of their current and future infrastructures. It contributes a degree of transparency and sustainable commitment allowing a Public Administration more linked and close to the concerns and interests of society.

The base project allows the possibility of proposing the following future lines of work:

- Obtaining models of buildings and services through neural networks based on historical records of technical parameters (consumption, temperatures, alarms, etc.) depending on uses (school periods, exam period, holidays, events, etc).

- Public mobile application for members of the university community and digital signage in information points that reflect parameters of interest generated after the development of Open Goverment surveys [19].

- Historical analysis for the development of hot and cold networks.

- Dissemination of the technology used in degree courses with content related to smart cities, building control, automation, energy efficiency and sustainability.

- Support with our platform research groups of the UCO with lines related to Smart Cities, Building Control, Sustainability, Efficiency, etc.

6 ACKNOWLEDGMENT

We appreciate the support and interest given to the University of Córdoba through the Vice-Rectorate of Infrastructure and Sustainability as well as the General Campus Coordination.

References

1. Serrano, M.: La Tecnología al servicio de las Smart cities. Plataforma de ciudad. In: I Congreso de Ciudades Inteligentes, pp. 330-335. Grupo Tecma Red S.L., Madrid (2015).
2. Smart City de Santander, http://www.smartsantander.eu, last accessed 2018/09/08.
3. Smart City de Málaga, http://smartcitymalaga.es, last accessed 2018/09/08.
4. Smart Cities, Fundación Telefónica, http://smartcity-telefonica.com, last accessed 2018/09/08.
5. 5The Smarter Cities, IBM Client Center, http://www.ibm.com/ibm/clientcenter/lagaude/smarter_city_solution.shtml, last accessed 2018/09/08.
6. Khabous, N.; Bouassida Rodríguez, I.; Gharbi, G.; Jmaiel, M.:A threshold based context change detection in pervasive environments: application to a smart campus. Procedia computer science 32, (2014), pp. 461-468.
7. De Angelis, E.; Ciribini, A.L.C.; Tagliabue, L.C.; Paneroni, M.: The Brscia smart campus demonstrator. Renovation toward a zero energy classroom building. Procedia engineering 118, (2015), pp. 735-743.
8. Trilles, S.; Calia, A.; Belmonte, O.; Torres-Sospedra, J.; Montoliu, R.; Huerta, J.: Deployment of an open sensorized platform in a smart city context, Future Generation Computer Systems 76 (2017), pp. 221–233.
9. Oluwaseun, J.; Adeyemi, S.; Popoola, I.; Aderemi, A.; Atayero D.; Afolayan, G.; Ariyo, M.; Adetiba, E.: Exploration of daily internet data traffic generated in a smart university campus. Data in Brief 20 (2018), pp. 30-52.
10. Popoola, I.; Aderemi, A.; Atayero, A.; Theresa, T.; Okanlawon, T.; Benson, I.; Omopariola, B.; Olusegun, A.; Takpo, A.: Smart Campus: data on energy consumption in a ICT-driven university. Data in Brief 16 (2018), pp. 780-793.
11. Vicerrectorado de Smart-Campus, https://www.uma.es/smart-campus, last accessed 2018/09/08.
12. UA Smart University, https://web.ua.es/es/smart/smart-university-hacia-una-universidad-mas-abierta-universidad-de-alicante.html, last accessed 2018/09/08.
13. Smart Campus Universitat Jaume I, http://smart.uji.es, last accessed 2018/09/08.
14. Universidad de Zaragoza, https://serviciomantenimiento.unizar.es/smart-campus, last accessed 2018/09/08.
15. Universidad de Cordoba, http://www.uco.es/servicios/informatica/trafico, last accessed 2018/07/15.
16. Vázquez, F, Romero, C, & De Castro, C.: Domótica e Inmótica Viviendas y Edificios Inteligentes. Rama Editorial. Madrid (2010).
17. Rodríguez, A.: Sistemas SCADA. Marcombo Ediciones Técnicas. Barcelona (2007).
18. Universidad de Cordoba http://www.uco.es/servicios/dgppa/images/sepa/huellaC2017.pdf , last accessed 2018/09/08.
19. Enerlis, Ernst and Young.: Libro Blanco Smart Cities. Ferrovial & Madrid Network (2012).

Modelo de Open Data GAQO

Grace Andrea Quintana Ortega[1][0000-0003-2008-2413] and
Jorge Sneider Quintana Ortega[2][0000-0003-2341-4065]

[1] Ministerio de Educación Nacional, Bogotá, Colombia
[2] Universidad Francisco de Paula Santander, Cúcuta, Colombia
graceaquintana@hotmail.com
sneiderquintana@hotmail.com

Resumen. Se presenta a través del presente comunicado el modelo de apertura GAQO de datos (Gobierno, Administración, Calidad y Optimización de datos – Government, Administration, Quality, Optimization of data), el cual es el resultado del paso a paso de un ejercicio de investigación a los modelos covencionales.

El modelo busca innovar en la forma de abrir los datos, con el fin de darles uso adecuado y eficiente, optimizando la apertura al iniciar con una fase de identificación de las problemáticas que atañen a los productores de éstos, enfocándose no en el dato como otros modelos, sino en el problema.

Palabras clave: Datos, Apertura, Analítica de datos, Desarrollo, Explotación de datos, movilidad, tráfico.

1 Apertura de Datos

El desarrollo de las ciudades inteligentes en gran parte proviene del uso eficiente de los datos, sin embargo, actualmente la mayoría de modelos de apertura de datos se enfocan en "el dato" tal como lo hacen la guía de datos abiertos del estado colombiano, la apertura y reutilización de datos públicos de acuerdo con Marín Álvarez de la W3C Spain Office-CTIC, el grupo de datos abiertos de la FEMP, el modelo y estrategia de datos abiertos de Perú, la alianza para el gobierno abierto de Costa Rica y otros más, logrando una apertura que no responde a un problema y presentándose de manera compleja para quienes no poseen una experticia en el tema, teniendo en cuenta que para una misma base de datos abiertos no se responde la totalidad de un problema; razón por la cual se ha creado el modelo GAQO de datos (Gobierno, Administración, Calidad y Optimización de datos – Government, Administration, Quality, Optimization of data) el cual parte del "problema", como una forma de darle solución eficaz. GAQO como cualquier modelo requirió de una investigación paso a paso, para definir y desarrollar su estructura, directrices y conceptualización.

El uso de este modelo permite realizar una publicación a conciencia de los datos, para que sean más accesibles y usables, los cuales responden a una problemática de índole privada o pública que necesita ser solucionada, brindando toda la información necesaria para los investigadores, reduciendo los tiempos de investigación otorgando mayor espacio para dedicar a la solución del problema y no a la investigación de este. En fin, se proyecta a que las ciudades inteligentes hagan un uso adecuado de los datos y la tecnología para empoderar a los ciudadanos.

Según la política de explotación de datos del Departamento de Nacional de Planeación de Colombia (junio, 2018), se estima que, "en 2020 en promedio cada persona en el mundo generará 1,7 Megabits cada segundo"3, para lo cual es importante contar con un modelo de apertura de datos que saque el mayor provecho de toda la información que se gestionará en el futuro.

1.1 Modelo GAQO

La transformación digital en el mundo entero es inminente. Lo que es claro, es que dicha transformación no es sólo tecnológica; los procesos de las instituciones, los planes, la mejora continua, las metodologías utilizadas, el aumento de trámites y servicios dispuestos a los ciudadanos completamente en línea y un sinfín de acciones que corroboran que la cuarta revolución ha llegado.

Desde luego, uno de los grandes impactos en este cambio de la industria es la masificación del internet (incluyendo el internet de las cosas), la automatización de procesos, la computación en nube y los datos que es donde justamente nos centraremos.

Dentro de los programas de Gobierno Electrónico a nivel mundial, existe la tendencia hacia el gobierno abierto, con el fin de ofrecer mecanismos de participación a los ciudadanos a través de los cuales puedan interactuar con el estado, colaborar y tener voz en la resolución de asuntos públicos para fomentar un estado más transparente. Estas tendencias permiten que los ciudadanos además de proponer ideas, proyectos y dar su opinión, puedan exigir a los gobernantes mediante los ejercicios participación ciudadana acceder fácilmente a información de interés y estar activos en la gobernanza de sus países.

Es aquí en donde entran a jugar un papel importante los modelos de apertura de datos y claro, de analítica de datos. Los modelos analizados de apertura de datos se basan en "el dato"; un término desconocido hasta hace unos pocos años y que en la actualidad se ha convertido en el recurso más significativo de los estados (llegando a compararlo incluso con el oro), saltando la importancia de conocer el problema, ya que este es quien brinda el valor agregado al dato; puesto que sin conocer el problema se desestima el impacto del dato. sin embargo, pocos usuarios conocen la manera de sacar provecho a estos datos abiertos; los procesos de apertura comienzan con la identificación de la información gestionada en las diferentes áreas o por toda una empresa o entidad, pero nunca se preocupan por "los problemas presentes", los cuales podrían ser resueltos gracias al uso eficiente de estos.

A continuación, se nombrarán algunos de los modelos analizados a modo comparativo, para que el lector comprenda la importancia del modelo propuesto:

1. Programa Gobierno Abierto de la República de Costa Rica: El cual ve como un derecho el acceso a la información pública y en específico los datos abiertos del país; entendiendo la "información pública" como cualquier tipo de dato que sea generado o resguardado por quien ejerza una función o potestad pública y que no tenga su acceso restringido por ley. "Este pretendía llevar a cabo un proceso que permitiera construir de manera colaborativa aquellos elementos necesarios para poner a disposición de la ciudadanía datos públicos en formato abierto, neutral e interoperable", donde notoriamente se abrirá cualquier dato que sea clasificado como público y a pesar de querer solucionar problemáticas no se enfocan en el problema sino en el dato.

2. Datos abiertos CEPAL: A través de la serie gestión pública # 74, en donde argumenta que "el Open Data consiste en la puesta a disposición de la sociedad de manera libre gran cantidad de datos procedentes de diferentes organizaciones, fundamentalmente del ámbito de la Administración Pública o de aquellos proyectos que han sido financiados con dinero público o creados por una institución pública", basándose en la apertura por defecto para que los mismos ciudadanos puedan usarlos como consideren, siendo el dato el componente con mayor valor.

3. Modelo y estrategia de datos abiertos gubernamentales de Perú: El cual se diseñó enfocándose en los procesos y la cadena de valor de los datos abiertos, teniendo como fin una visión completa y compartida de todos los procesos de nivel estratégico, operativo, apoyo o soporte, incluyendo los procesos de medición del desempeño e impacto; modelo que se basa en los datos públicos del gobierno de Perú.

4. G8. Open Data Charter: El cual considera la apertura de datos por defecto, donde toda la información del gobierno debe estar dispuesta a los ciudadanos (exceptuando los datos privados). En este documento se plasma la intensión de los líderes de Canadá, Alemania, Francia, Alemania, Italia, Japón, Reino Unido, Estados Unidos, Rusia y la Unión Europea, de promover la transparencia, la innovación y la rendición de cuentas a través de la apertura de la información pública.

5. Open Data HandBook: El cual argumenta que entre mayor número de conjuntos de datos se puedan abrir es mejor, dado a que lo ven como un ejercicio de innovación en el que inicialmente no hay requisitos para los conjuntos de datos que se van a abrir; a través de cuatro pasos, elegir un conjunto de datos, elegir una licencia abierta, hacer disponible y visible la información, sin restricciones.

Después de analizar varios de los modelos actuales de apertura de datos (en especial los anteriormente mencionados), se realizó un ejercicio de investigación e innovación, de donde se crea el modelo GAQO (Gobierno, Administración, Calidad y Optimización

de datos – Government, Administration, Quality, Optimization of data), el cual se enfoca antes que en el dato en los posibles problemas a resolver.

Es inevitable el aumento del uso de los datos abiertos, lo que no es claro para los usuarios es cómo utilizar esos datos, para qué les sirven y de qué manera sacar provecho a la información que se encuentra disponible. Por esta razón, el modelo de apertura de datos GAQO hace un proceso de reingeniería a los métodos conocidos de apertura y lo que busca es la explotación y uso eficiente de dichos datos desde el principio de la apertura.

Componentes del modelo GAQO.

Los siguientes son los componentes del modelo GAQO, los cuales representan el parámetro para asegurar el buen uso de los datos:

Gobierno. El Gobierno de datos es la habilidad que tiene la entidad, empresa, ciudad (en genera el responsable de la apertura de datos) de gestionar la información que posee, identificando claramente los atributos de sus datos, de la información y el flujo que esta sigue en el entorno. Para el modelo GAQO, la característica de gobierno es importante puesto que esta permite reconocer los posibles datos que darán respuesta a los problemas, a las ineficiencias en procesos, en las metodologías.

Administración. Después del gobierno, la administración de los datos permite el aprovechamiento de la información para mejorar los procesos, mitigar los riesgos y solucionar los problemas, utilizando estratégica y eficientemente los datos.

Calidad. El modelo GAQO precisamente hace que los datos abiertos estén depurados desde la primera fase y no cualquier dato sea publicado, que la apertura sea posterior a la verificación de los usos que se le podrían dar a estos; lo que por supuesto influye en la calidad y la generación de confianza en la explotación de los mismos desde el principio. La medición de la calidad de los datos debe ser continua, con el fin de garantizar los atributos necesarios para su uso.

Optimización. La apertura de los datos a conciencia por defecto hace que sean más fáciles de usar, más íntegros y con mayor consistencia. La fase de priorización del modelo GAQO evalúa la fiabilidad, eficiencia y conveniencia de los datos a publicar, con el fin de optimizar el proceso de apertura.

El modelo debe aplicarse sin desestimar las características sugeridas por varias guías cómo por ejemplo, la guía de datos abiertos del estado colombiano, donde los datos deben ser primarios, accesibles, procesables, completos, no propietarios, oportunos y actualizados, licenciados de forma abierta y no discriminados.

Fases del modelo GAQO

Los responsables de abrir los datos generalmente no se interesan por ¿qué uso van a tener?, ¿qué impacto tendrán para los usuarios?, ¿generarán valor?... sino que simplemente hacen la clasificación de estos para saber si pueden o no ser públicos y en caso de que sí los abren.

El modelo GAQO permite que antes de la apertura se conozcan los posibles usos que se le van a dar a los datos, por lo cual en la siguiente imagen se representan las fases:



Fig. 1. Fases del modelo GAQO.

Descripción de las Fases:

Desarrollo del modelo de apertura de datos GAQO, basado en el paso a paso de la investigación para solucionar los problemas de movilidad presentes en la ciudad de Bogotá D.C. – Colombia a través de VOLTARIIO un vehículo transformable. Esta investigación es tomada como fuente para el Desarrollo del modelo GAQO, lo cual no significa que el uso del modelo este limitado a este tipo de investigaciones y problemáticas, teniendo claridad en que GAQO es un modelo de apertura de datos.

1. Problemas actuales: Los responsables de abrir los datos y quienes gestionan la información para cumplir con sus funciones (áreas, dependencias, los gobernantes y demás), en esta primera fase deberán reconocer los principales problemas que se

tienen al interior de la entidad, de la empresa, del municipio, elaborando un listado consolidado en donde se puedan identificar el total de las problemáticas que requieren solución y a las cuales por diferentes factores no se han podido resolver.

El problema (investigación VOLTARIIO): El gobierno o instituciones, empresas y demás que poseen los datos que se pretenden abrir a las cuales llamaremos PRODUCTOR, deben detectar la problemática o problemáticas a las cuales se les pueda brindar solución con estos DATOS. Así por ejemplo en el proyecto VOLTARIIO, el investigador o consumidor que en este caso se entiende como el PRODUCTOR para fines del desarrollo del modelo identifica que: la movilidad en Bogotá es un problema que no solo afecta los tiempos de traslado de los capitalinos, sino que también su calidad de vida debido al tiempo transcurrido en tráfico, el medio ambiente que es afectado por la gran cantidad de emisiones contaminantes, el uso irresponsable del espacio que no responde a las necesidades de transporte y carga de los usuarios, el comercio que es afectado por retrasos de tiempo en transporte y la infraestructura que es insuficiente para albergar la gran cantidad de vehículos automotores disponibles para la movilidad y parqueo.

GAQO entiende entonces que la investigación responde a una necesidad, a una problemática previamente identificada por el PRODUCTOR que pretende ser solucionada a través de la analítica de datos, datos que se encuentran dispersos en múltiples bases de datos haciendo la información poco visible y por tanto en muchos casos poco accesible, invalidando la garantía de que los investigadores posean todas las herramientas para brindar solución a las problemáticas, ya que estas no están identificadas y los datos se abren sin responder a esta identificación.

2. Datos que responden los problemas: los problemas pueden ser solucionados por medio del análisis y la gestión de los datos correctos; por este motivo, en esta fase los PRODUCTORES, deberán reconocer los que consideren pueden responder a las problemáticas identificadas en la primera fase del modelo GAQO, teniendo en cuenta que sean datos que se gestionen periódicamente y estén relacionados con las dificultades presentes en el entorno. Esta fase, es la que permite que los datos obtengan el valor adecuado; puesto que, al momento de su apertura, ya están pensados para resolver o mejorar algún hallazgo; es decir, que se tendrán inicialmente unos posibles datos los cuales serán gestionados para ser abiertos sin filtro o depuración de la información, con el fin de responder a las problemáticas identificadas; desde luego teniendo en cuenta las leyes de protección de datos personales o las que tengan lugar.

Teniendo en cuenta el problema mencionado en la fase anterior, los datos disponibles en el portal de datos abiertos del estado Colombiano de la base de datos de la secretaría distrital de movilidad, responden a variables como tiempo en tráfico, distancia, medio de transporte, cantidad de personas, día pico; los cuales son datos insuficientes para el desarrollo de una investigación de alto impacto donde el investigador o consumidor, requiere una perspectiva global del problema y sus principales fuentes.

Para que un consumidor pueda brindar solución por ejemplo a las problemáticas de movilidad, además de la información del conjunto de datos abierto ya mencionados, deben ser tenidos en cuenta de acuerdo con la investigación realizada datos como: la huella de carbono generada por individuo, toneladas de CO2 emitidas por año, necesidad de transportar equipaje diariamente, lugares de mayor grado de accidentalidad en la ciudad, puntos más congestionados, velocidad crucero, parámetros de la zona de control, cantidad de vehículos vendidos en el país, vida útil del parque automotor, e incluso el color, datos que brindan una mayor perspectiva y entendimiento del porqué se está generando el problema; así, si el color de carrocería rojo está relacionado con un gran número de accidentes, se podrían tomar acciones para evitar la venta y distribución de este tipo de colores.

De acuerdo entonces con el modelo GAQO (que define como base la problemática a resolver), se procede a la consecución de datos que sirvan para brindar una solución al problema.

3. Clasificación de los datos: Los datos deben ser clasificados de acuerdo con la normativa que aplique; es decir, determinar si son o no publicables teniendo en cuenta las leyes de protección de datos personales, transparencia, acceso a la información pública y demás que apliquen al país productor, para garantizar que se abran los datos que puedan explotarse oportuna y estratégicamente, seleccionando de acuerdo con sus características los que se consideren que respondan a las necesidades identificadas.

4. Apertura de datos: Luego de la fase de clasificación, se continua con la apertura y publicación de los datos en un portal público al que tenga acceso la comunidad en general.
   Los PRODUCTORES se destinan a la apertura de los datos, no simplemente con la publicación de estos dentro de las plataformas, sino también informando a todos los entes que podrían hacer uso eficiente de estos, tales como: universidades, institutos, semilleros, entre otros lo que garantiza que estos datos van a ser evaluados y utilizados en múltiples soluciones.

Desde luego este y cualquier modelo de apertura de datos debe estar apoyado por sistemas tecnológicos eficientes, personal capacitado y motivado para implementarlo de manera correcta.

GAQO genera valor público al permitir desarrollo social y económico a los territorios, debido al uso estratégico de los datos, que desde la apertura se enfocan en resolver problemáticas existentes en una empresa, entidad, ciudad o incluso un país.

Después de realizar la investigación de los modelos clásicos de apertura de datos, se puede concluir que requieren enfocarse en el problema más que en los mismos datos; ya que estos últimos son un término poco usado en la cotidianidad y usualmente, las personas conocen más respecto a las problemáticas que la información que hay sobre un tema en específico.

Este modelo está diseñado para tener conciencia de la apertura por parte de los responsables, contradiciendo a la tendencia mundial de apertura por defecto la cual continuaría llenando la nube (el espacio disponible de internet) con información que

quizá nunca vaya a ser utilizada, provocando un colapso a futuro y creando una nueva problemática tal como sucedió con el direccionamiento IPv4 el cual se creía infinito en su momento y ahora estamos en proceso mundial de transición a IPv6, tal vez ocurra lo mismo con la nube, llegará el día en que no exista espacio dentro de esta si continuamos cargando en ella cualquier información.

La diferencia entonces entre GAQO y los demás modelos de apertura de datos estudiados radica en:

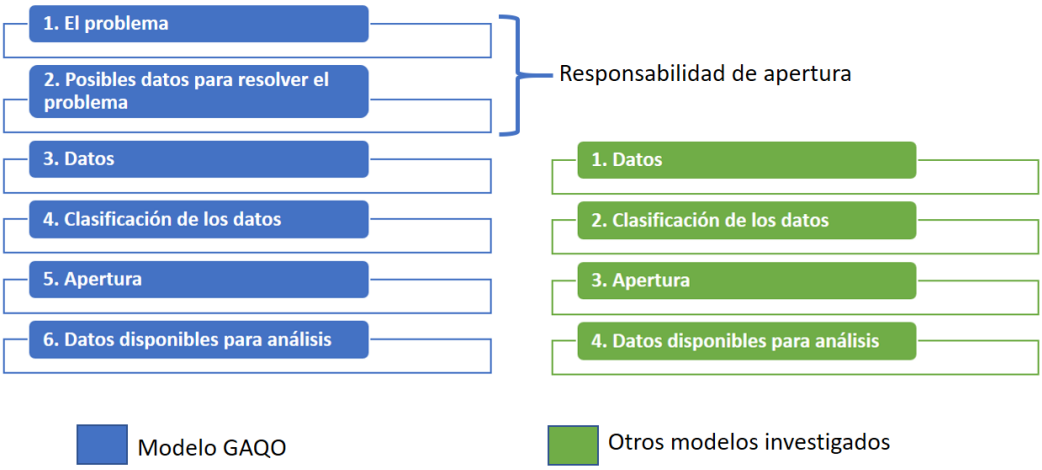


Fig. 2. Comparación modelos de apertura de datos

La responsabilidad de apertura es la característica principal que diferencia a GAQO de los demás modelos investigados, a través de la identificación inicial del o los problemas y los posibles datos para resolver dichos problemas.

Es importante que los datos que se abran sean útiles a la ciudadanía, esto no puede ser una iniciativa de sólo un grupo de personas, debería ser la razón para permitir la apertura y en su defecto, reorganizar los conjuntos de datos abiertos que ya existen.

2. Analítica de Datos

No sólo se trata de abrir datos de interés, sino de que sean usados eficientemente; es decir, que exista una correcta analítica de los datos que se disponen, aunque esto depende del actor que requiere responder a una problemática basado en los conjuntos de datos que se encuentren abiertos.

Es aquí donde se puede entender que el modelo de apertura GAQO, da como resultado toda información de interés para resolver problemáticas comunes, permitiendo que los datos que están disponibles sean útiles, puesto que están diseñados para ello.

2.1 Análisis con GAQO

Las Entidades, empresas privadas y los ciudadanos se encuentran generalmente antes que con el dato, con el problema, es por ello por lo que los PRODUCTORES serán ahora los encargados de analizar antes, para qué sirven dichos datos y quienes serán los posibles beneficiados.

La analítica de datos toma tiempo, los procedimientos dispuestos hasta el momento por los gobiernos y diferentes modelos de analítica, consienten en que el usuario primero recopila la data, luego la consolida en conjuntos de características similares, debe ser depurada, analizada y posterior a este trabajo, sí se puedan resolver las problemáticas o identificar el porqué de los datos; otra metodología es que los ciudadanos y usuarios en general se encuentran con un número potencial de datos abiertos, sin saber para qué pueden servir y lo que hacen es que realizan diferentes análisis de conjuntos de datos para encontrar al final tal vez una o ninguna respuesta a las necesidades cotidianas. Mientras que los usuarios de los datos abiertos por medio del modelo GAQO, conocerán desde un inicio los posibles usos que se le podrán dar a esos datos. Sin limitar de manera alguna las múltiples soluciones que se pudieran obtener con estos mismos, ya que GAQO permite reducir tiempo de investigación y búsqueda a los consumidores para la analítica.

Para lo cual este proceso de analítica de datos contempla los siguientes pasos:

1. Identificación del Problema: Los ciudadanos y usuarios en general conocen las problemáticas que deben ser resultas, son ellos mismos quienes necesitan solucionar inconvenientes que se presentan con el día a día, por esto la primera etapa de la analítica de GAQO es la identificación del problema por parte del CONSUMIDOR, en sí el usuario de los datos o el perjudicado con el problema.

2. Uso de los datos abiertos: Una vez se haya identificado el problema a resolver, el CONSUMIDOR determina qué tipo de datos requiere para poder solucionar dicho problema.

3. Análisis de datos: Se realiza el análisis de los datos que se identificaron como potenciales para resolver el problema; es decir, se realiza el proceso de revisión, depuración, limpieza y transformación de los datos encontrados, que son útiles para la toma de decisiones, gestión de proyectos, innovación y desarrollo de soluciones a la medida, con el fin de solucionar el problema identificado inicialmente.

4. Solución del problema: Habiendo analizado correctamente los datos abiertos, el usuario puede encontrar la solución a la problemática identificada, proponer respuestas que son el resultado de la investigación desarrollada.
   La solución de problemas gracias al uso de los datos permite el avance de los territorios, mejoras en la movilidad, el gobierno, la ciencia y la tecnología, propicia la investigación y el desarrollo.

Conclusiones.

1. GAQO propicia que los datos abiertos puedan satisfacer las necesidades de información para la resolución de problemas.
2. El modelo genera valor al estado, dando la posibilidad de apuntar a un gran número de áreas, contribuyendo en la creación de nuevos proyectos, productos y servicios con la participación ciudadana sin exclusión[6].
3. Usando el modelo será más fácil para los ciudadanos dar solución a las problemáticas comunes que se presentan con el día a día, puesto que los responsables de la apertura lo harán a conciencia desde el primer momento.
4. Se disminuyen los tiempos requeridos por los investigadores en la búsqueda de datos que respondan a las problemáticas identificadas por estos.
5. Se mejora el modelo de apertura por defecto de datos de la actualidad, a través de la apertura con responsabilidad.
6. Se evitará desbordar la nube, en sí los portales de datos abiertos del mundo, puesto que los conjuntos de datos abiertos responderán a necesidades que requieren ser solucionadas, por lo cual será información relevante para los consumidores.

Referencias.

1. Access Info Europe and the Open Knowledge Foundation. “Beyond Access: Open Government Data & the Right to (Re)use Public Information” (2011).
2. Álvarez Espinar, Martín.: Apertura y reutilización de datos públicos, W3C Spain Office-CTIC. Barcelona, Generalitat de Catalunya. (2014).
3. Departamento Nacional de Planeación.: Política de Explotación de datos-Big Data. En CONPES 3920. (2018).
4. Canal CARACOL, http://caracol.com.co/radio/2013/10/08/bogota/1381219920_990628.html, último acceso 2018/04/14.
5. Canal CARACOL, http://caracol.com.co/radio/2013/10/08/bogota/1381219920_990628.html, último acceso 2018/05/07.
6. European Commission. Directorate-General for Communications Networks, Content and Technology. A vision for public services, http://ec.europa.eu/

information_society/newsroom/cf/dae/document.cfm?doc_id=3179, último acceso 2018/03/11.
7. Fernández Ramos, Severiano. Transparencia, acceso a la información pública y buen gobierno: Ley 19/2013, de 9 de diciembre. Cizur Menor, Navarra: Aranzadi. (2014).
8. Gastón Concha, Alejandra Naser.: Datos abiertos: Un nuevo desafío para los gobiernos de la región, CEPAL, Santiago. (2012).
9. GEL. (s.f.). Programa del Gobierno en Línea de la República de Colombia. Investigación Lineamientos para la implementación de Datos Abiertos en Colombia. Septiembre de 2011.
10. Harrison, Teresa; Guerrero, Santiago; G. Brian Burke, Meghan Cook, Anthony Cresswell, Natalie Helbig, Jana Hrdinová,Theresa Pardo. "Open Government and E-Government: Democratic Challenges from a Public Value Perspective".
11. Hernández López, José Miguel.: Código de transparencia y derecho de acceso a la información pública. Madrid: Instituto Nacional de Administración Pública. (2015).
12. Lathrop, D. and Ruma. L.: Open Government: Collaboration, Transparency, and Participation in Practice. O'Reilly Media, Inc. (2010).
13. Manfredi Sánchez, Juan-Luis.: Horizontes de la información pública. El profesional de la información. Vol. 26, n. 3, 2017, http://www.elprofesionaldelainformacion.com/contenidos/2017/may/01.pdf, ultimo acceso 2018/04/07.
14. Marquez, J.M. et al.: Estudio de la demanda y uso de gobierno abierto en España, http://www.ontsi.red.es/ontsi/sites/default/files/demanda_y_uso_de_gobierno_abierto_en_espana.pdf, último acceso 2017/11/09.
15. McDermott P. Building open government. Government Information Quarterly 27, 401-413 (2010).
16. Mayer-Schönberger, V., y Cukier, K.:. Big data. La revolución de los datos masivos. Madrid: Turner Publicaciones. (2013).
17. Muente, Arturo; Serale, Florencia.: Los datos abiertos en América y el Caribe. (2018).
18. Naser, Alejandra; Hofmann, Andrés. La contribución del gobierno electrónico y los datos abiertos en la integración regional. CEPAL. (2016).
19. OPEN DATA HANDBOOK, http://opendatahandbook.org/guide/es/why-open-data, último acceso 2018/02/24.
20. Open Government, 10 ideas para hacer tu Ayuntamiento Abierto. Observatorio Regional de la Sociedad de la Información de Castilla y León.
21. Portal de Datos Abiertos de Colombia, https://www.datos.gov.co, último acceso 2017/08/21.
22. Pouche, Mario.: Estrategia nacional de datos gubernamentales del Perú y modelo nacional de datos gubernamentales. (2017).
23. Schmarzo, B.: Big data. El poder de los datos. Madrid: Anaya Multimedia. (2014).
24. TOMTOM traffic, https://www.tomtom.com/en_gb/trafficindex, último acceso 2018/01/15.

Designing Innovative Home Energy Systems for Smart Cities: The SilkHouse Project

Marcus Silva[1,2], Vicente Leite[1], Paulo Araújo[1,3], Ananda Simões[1,4], Iago Dalmarco[1,4], Ângela Ferreira[1], Luís Queijo[1]

[1] Instituto Politécnico de Bragança - Escola Superior de Tecnologia e Gestão Bragança, Portugal
[2] Universidade Salvador – Salvador, Bahia, Brasil
[3] Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus de Campo Mourão Paraná, Brasil
[4] Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus de Ponta Grossa Paraná, Brasil

pe.mpb@hotmail.com, avtl@ipb.pt, phxaraujo@gmail.com, ananda@alunos.utfpr.edu.br, iago.icd@gmail.com, apf@ipb.pt, lqueijo@ipb.pt

Abstract. This paper presents the complete design of a self-sustainable microgrid based on renewable energy sources - pico-hydro and photovoltaic - for the House of Silk museum. This on grid solution is based on the SMA Flexible Storage System using innovative technologies for energy production, storage and management. The microgrid is based on a cluster of three battery inverters which establish a three-phase supplying system. The hydro energy is generated using a low head, pico-hydro propeller turbine, and a horizontal wheel of a mill. Both are tied to the microgrid through an innovative solution, connecting generators to photovoltaic inverters. The photovoltaic energy is produced by means of high-performance photovoltaic conventional modules that will be mounted on the roof of the House of Silk and the components of hydropower generation will be installed inside the gallery of a former mill.

Keywords: smartgrids; photovoltaic; pico-hydro.

1 Introdução

Uma microrrede é um conjunto de cargas interligadas e recursos de energia distribuídos, dentro de limites elétricos claramente definidos, que atuam como uma única entidade controlável em relação à rede elétrica de serviço público (rede convencional) e que se pode conectar e desconectar da mesma para permitir que possa operar no modo conectado à rede convencional ou em modo isolado [1]. As microrredes, apresentam diversas vantagens como, por exemplo, a resiliência ea

integração renovável. No caso de excesso ou défice de produção, as microrredes podem, respetivamente, fornecer ou receber energia da rede convencional [2].

O projeto de microrrede a ser instalado na Casa da Seda, do Centro Ciência Viva de Bragança, pretende tornar um edifício autossustentável através da utilização de novas tecnologias de produção e utilização híbrida de fontes de energia, designadamente fotovoltaica e hídrica. Projetos como este conseguem ter visibilidade e despertar interesse da sociedade em saber como funcionam sistemas híbridos de geração de energia elétrica, auxiliam na identificação de potenciais energéticos renováveis, alguns ainda pouco explorados, e conscientizam para o uso racional da eletricidade.

Não é de hoje que as microrredes estão a sair de laboratórios para uma implantação mais ampla na comunidade [1]. Como a propriedade e os modelos de negócios das microrredes ainda estão em evolução, tomemos como exemplo as companhias americanas de eletricidade, como a Duke Energy, e os próprios fabricantes, como a SMA [3], que realizam testes em laboratórios a fim de oferecerem a seus clientes serviços de qualidade, uma vez que possuem conhecimento e infraestrutura de geração e distribuição adequada. Também no meio académico se podem destacar muitas iniciativas como o projeto VERCampus – Parque Vivo de Energias Renováveis [4] que desde 2007 [5] integra um conjunto de tecnologias, infraestruturas e iniciativas realizadas no Campus universitário do Instituto Politécnico de Bragança – IPB sobre as tecnologias de energias renováveis, promoção e divulgação de sistemas de geração de energia distribuída para estudantes, partes interessadas e toda a comunidade do IPB em geral.

Os desenvolvimentos experimentais em laboratórios e já implementados no projeto VERCampus, como plataforma de pesquisa e para fins de demonstração no contexto de um campus universitário, facilitaram e contribuíram para a escolha de soluções de sistemas, equipamentos e fabricantes a serem aplicados no projeto Casa da Seda. Foi a partir dos mais de dez anos de trabalho, ao comparar módulos fotovoltaicos, inversores e geradores síncronos de ímanes permanentes, que soluções dos fabricantes SMA e PowerSpout passaram a ser adotadas por apresentarem fiabilidade comprovada em laboratório [6].

O museu da Casa da Seda é uma propriedade do município de Bragança desde 1990, localizado na margem do Rio Fervença [7]. Historicamente, a população utilizava a edificação para tingir Seda no século XVIII. Nos séculos XIX e XX a propriedade funcionou como um moinho, depois começou a produzir pães e biscoitos regionais e em 2006 o edifício passou por uma reforma viabilizada pelo Programa Polis.

Desde o início de 2016, quando houve a conceção do projeto *SilkHouse - Development of a smart microgrid based on renewable energy sources and a monitoring system for the House of Silk*, não se deixou de lado a ideia do museu se tornar uma vitrine, tanto para os visitantes como para a academia, para constituir um laboratório vivo, em contexto real, dedicado ao projeto, monitorização e disseminação dos benefícios de uma microrrede inteligente. O projeto *SilkHouse* é promovido pelo Instituto Politécnico de Bragança, em cooperação com mais 4 parceiros (Centro Ciência Viva de Bragança, Instituto Politécnico do Cávado e do Ave, Instituto Politécnico da Guarda e a empresa JG Instalações Elétricas) e com o apoio do Município de Bragança. Este projeto é financiado pela União Europeia, através da FCT - Fundação para a

Ciência e a Tecnologia, com um valor total elegível de 149.915,79 €, e a sua conclusão está prevista para meados de 2019.

Além de trazer um conceito atual de geração de eletricidade e gestão de energia elétrica, a proposta pretende preservar a arquitetura existente, com pequenas adequações na sua infraestrutura e utilizar os recursos naturais disponíveis no local, como é o caso de recuperar o moinho numa das galerias, não mais para moer cereais, mas para gerar eletricidade, integrando-a na microrrede.

Deste modo, para a gestão e monitorização de energia do sistema foi projetada uma microrrede inteligente contendo conversores bidirecionais Sunny Island 4.4M da SMA, inversores Sunny Boy 1.5-1VL-40 e a gestão de energia é feita através do Sunny Home Manager 2.0. A microrrede é baseada na solução SMA designada por sistema de armazenamento flexível [8][9] e foi projetada tendo em consideração o perfil de carga do edifício para o melhor uso e aproveitamento das fontes endógenas de energia.

No sistema de armazenamento flexível da SMA as principais funcionalidades são: visualização dos dados do sistema no Sunny Portal, controle inteligente de cargas, limitação dinâmica de potência ativa, carregamento da bateria baseado em previsão, limitação de injeção de potência ativa para 0% ou 0 W, limitação automática de carga desequilibrada, controlo da energia acumulada no ponto de ligação à rede pública e acesso a serviços de gestão de rede via interface Modbus, por exemplo, para limitação de potência ativa trocada com a rede.

É importante destacar que neste projeto há a premissa de que não seja injetada potência na rede, de modo que toda a energia produzida ao longo do dia deve ser utilizada pelas cargas e a excedente seja armazenada no banco de baterias, complementada com uma gestão inteligente das cargas. Deste modo, promove-se o aumento do nível de autossustentabilidade do edifício, constituindo um modelo para as casas das cidades inteligentes.

2 Caracterização da Casa da Seda

2.1 Perfil de consumo

De uma auditoria realizada às instalações elétricas da edificação, destacam-se as seguintes informações para caracterização do perfil de consumo, fundamentais para elaboração do projeto e para estimar os benefícios da instalação da microrrede: rede de distribuição de energia em baixa tensão (BT), instalação trifásica, com potência contratada de 13,6 kW; funcionamento de terça-feira a domingo, das 10h às 18h e esporadicamente até às 24 h nos finais de semana quando ocorrem eventos; consumo médio diário de 45 kWh; consumo anual médio de 18,1 MWh, em 2014, 14 MWh, em 2015 e 16,7 MWh, em2016. A caracterização das principais cargas das instalação, em termos da potência nominal é apresentada na Tabela 1.

No projeto da microrrede, foram consideradas as seguintes estruturas como potenciais energéticos: telhado para instalação do sistema fotovoltaico, e galeria, onde outrora existiu um moinho, para instalação de duas unidades pico-hídricas, constituídas por uma roda de água horizontal e uma turbine de hélice. Além da vantagem desta ação

em revitalizar a infraestrutura do antigo moinho para fins de demonstração, aproveitando a sua capacidade de produção de energia numa solução de autoconsumo, a exploração dos sistemas hídricos explora a complementaridade sazonal entre a geração fotovoltaica e a hídrica, contribuindo assim para a autossustentabilidade energética da Casa da Seda.

Tabela 1. Cargas disponíveis na Casa da Seda.

Descrição	Quantidade	Potência total (W)
Computadores e periféricos	21	2160
Caldeira	1	170
Projetores	4	650
Sistemas de som	1	50
Ar condicionado	2	2500
Aquecedores	1	2000
Iluminação	38	1300
Cafeteira	1	1500
Forno de microondas	1	1200

No dimensionamento da microrrede da Casa da Seda foi utilizada a ferramenta Sunny Design da SMA, a qual permite especificar e quantificar os equipamentos do sistema a ser implementado. Das propostas apresentadas pela SMA e pelo perfil de carga e consumo da Casa da Seda, o sistema de Armazenamento Flexível SMA é o mais adequado.

Na estruturação da microrrede, além dos módulos fotovoltaicos, da roda de água horizontal e da turbina, será possível armazenar o excesso da produção de eletricidade num banco de baterias, permitindo a sua utilização quando a produção de energia elétrica é insuficiente e/ou nos horários em que a tarifa da rede for mais cara ou inviável. Com a capacidade de armazenamento de energia e de gestão e controlo destes recursos e das cargas da instalação é possível aumentar a quota de autoconsumo e a quota de autossuficiência, reduzindo assim, as necessidades de interação com a rede elétrica convencional, procurando obter um saldo anual nulo, entre a energia produzida e a consumida.

2.2 Conceitos de quota de autoconsumo, quota de autossuficiência e autossustentatibilidade na Casa da Seda

O projeto analítico da geração fotovoltaica para o edifício da Casa da Seda foi complementado com o Sunny Design, que é o programa da SMA para a conceção de sistemas fotovoltaicos, com ou sem armazenamento.

O projeto foi baseado num sistema ligado à rede (*on grid*), com autoconsumo através do armazenamento da energia excedente - produzida pelas fontes de energia da microrrede - num banco de baterias. Como foi adotado o sistema de armazenamento flexível da SMA, o autoconsumo e a autossuficiência podem ser otimizados para o

melhor aproveitamento das fontes de energia, fotovoltaica e pico-hídrica, em relação ao perfil da carga do consumidor.

Assim, na perspetiva de compreender e justificar o conceito de autossustentabilidade do projeto, torna-se necessário analisar as quotas de autoconsumo e de autossuficiência do sistema [9]. Ao estimar a geração fotovoltaica (PV) e a demanda anual, percebe-se que a geração PV é diretamente proporcional à quota de autossuficiência e inversamente proporcional à quota de autoconsumo (Fig. 1). Já em relação à demanda ocorre o contrário. O ideal é, para uma determinada demanda, maximizar essas quotas, o que não é fácil uma vez que a geração PV não é controlada e a demanda depende do perfil de consumo.



Fig. 1. Análise das quotas de autoconsumo e autossuficiência.

Como a geração de energia fotovoltaica está limitada aos períodos em que há radiação solar, pretende-se fazer a gestão de cargas da microrrede nos períodos de maior produção, recorrendo à rede elétrica apenas quando necessário. Isto aumenta significativamente a quota de autoconsumo, com o objetivo de consumir toda a energia produzida, em termos anuais.

O fluxo de potência é controlado de forma a que, antes de recorrer à rede elétrica convencional, é dada prioridade ao consumo de energia proveniente dos sistemas PV e pico-hídricos, ou ainda, utilização da energia armazenada nas baterias. Nos casos em que seria possível injetar potência na rede, que não é o caso desta microrrede, ou reduzir a potência gerada pelos inversores PV, deve-se prioritariamente, carregar as baterias e ligar cargas selecionadas para o efeito.

A gestão de produção, consumo e armazenamento de energia na microrrede é realizada através da parametrização do Sunny Home Manager 2.0, no qual é inserido o perfil de carga do consumidor e assim é monitorizado o fluxo de energia do sistema. As ações de carga e descarga das baterias, e quando se deve utilizar a energia da rede, são tomadas pelo Sunny Home Manager 2.0 que troca comandos com o Sunny Island 4.4M. Este conversor bidirecional realiza, física e eletricamente, esta gestão de cargas. Se o Sunny Home Manager 2.0 não fosse instalado, que potencialmente é um equipamento que garante uma melhor gestão e segurança do fluxo de energia e comandos dentro da microrrede, parte destas funções caberia ao *master* Sunny Island.

O Sistema de Armazenamento Flexível da SMA suporta o aumento do autoconsumo através das seguintes medidas: armazenamento temporário de energia em excesso no banco de baterias (48 V), conectado aos conversores Sunny Island; controlo de cargas deslastráveis e monitorização dos sistemas de produção com o Sunny Home Manager.

Como a SMA disponibiliza diagramas que podem ser utilizados, como ponto de partida, no planeamento detalhado do armazenamento de energia de um sistema de armazenamento flexível [9], conclui-se que esse ponto ótimo ocorre quando as quotas de autoconsumo e autossuficiência atingem valores em torno de 55% (Fig. 2 e 3). Um requisito importante para aumento das quotas de autoconsumo e autossuficiência é o balanço correto entre os valores anuais da geração PV e da demanda de energia.

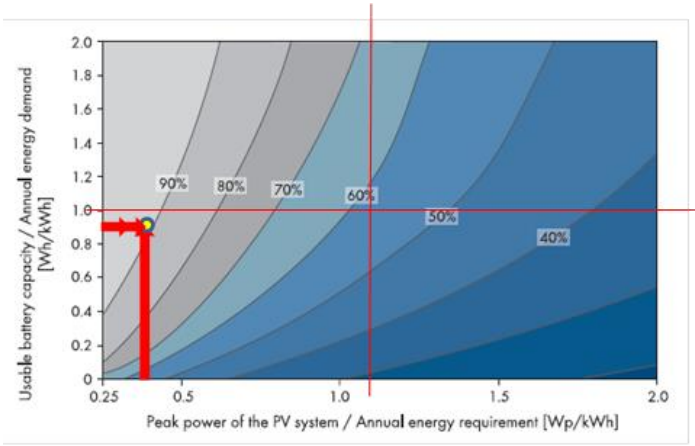


Fig. 2. Análise da quota de autoconsumo da casa da seda (adaptada de [9]).

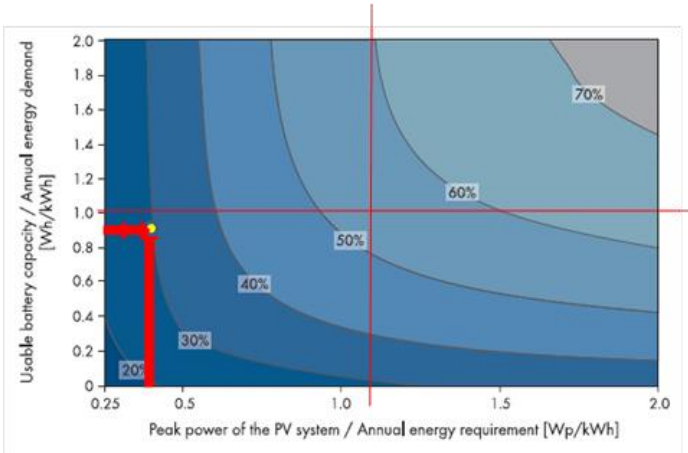


Fig. 3. Análise da quota de autossuficiência da casa da seda (adaptada de [9]).

Para se determinar o valor dessas quotas, através dos diagramas das Fig. 2 e 3, numa primeira fase é calculado o fator Wp/kWh (eixo das abscissas) sem considerar o banco de baterias e ações de eficiência energética, como por exemplo a substituição do sistema de iluminação por um mais eficiente, que, no caso em estudo, é igual a 0,25 Wp/kWh. A quota de autoconsumo, neste caso, é de 57% e a de autossuficiência é, sensivelmente, 18%. Ao considerar a capacidade de armazenamento das baterias a 50% e a ações de

eficiência energética, sendo expectável uma redução no consumo de 1,9 MWh/ano [7], o fator Wh/kWh (eixo das ordenadas) é igual a 0,9, deslocando as quotas de autoconsumo e autossuficiência para, 92% e 28%, respetivamente.

Assim, para o projeto da Casa da Seda, ao depender apenas da geração PV e ao introduzir o banco de baterias com capacidade de 30 kWh, o aumento da quota de autoconsumo em aproximadamente 35% é mais relevante que o ganho de 10% na quota de autossuficiência. No entanto, ao considerar a geração pico-hídrica, poder-se-á atingir um novo ótimo entre esses dois parâmetros se a potência de pico produzida pelas fontes de energia renovável atingir 15 kWp. No entanto, o projeto para a microrrede da Casa da Seda prevê uma produção PV de 4,5 kWp e pico-hídrica em torno de 1,5 kWp, totalizando 6 kWp. Assim, a otimização absoluta das quotas só poderá ser atingida se houver a redução da demanda anual (cargas elétricas). Este equilíbrio, para além de melhorar a relação produção vs. consumo, também permite aumentar a vida útil das baterias.

3 Caracterização da Solução

3.1 Proposta inicial

O projeto da Casa da Seda [7] foi desenvolvido em 2017 e consistia numa microrrede composta pelos seguintes equipamentos (Fig. 4): 3 conversores Sunny Island, 4 inversores Sunny Boy, 1 turbina pico-hídrica, 1 fileira de telhas PV, de 9 W cada, do fabricante ZEP, 3 kWp de módulos PV, banco de baterias, ainda sem especificação do controle remoto de gestão das baterias. Além disso, estava prevista uma ação de eficiência energética, que incluía a substituição do sistema de iluminação por um sistema recorrendo a lâmpadas LED. Esta ação está a ser programada no âmbito do projeto em curso, bem como a reabilitação da galeria onde vão ser instaladas as unidades pico-hídricas, através do seu isolamento térmico e acústico.



(a) **(b)**

Fig. 4. Microrrede para a Casa da Seda: (a) conceção inicial [7], (b) 30 telhas fotovoltaicas ZEP Blackline em fase de testes [10].

3.2 Proposta atual

O projeto inicial sofreu algumas adaptações, designadamente, substituição das telhas fotovoltaicas por módulos fotovoltaicos convencionais, atendendo a que os custos acrescidos com a substituição de parte do telhado, tornam esse projeto inviável no âmbito do projeto SilkHouse. Acresce ainda que os testes realizados com 30 telhas fotovoltaicas ZEP Blackline, apresentada na Fig. 4.b, evidenciam sombreamento parcial das células PV, produzido pelas próprias telhas, de manhã e à tarde. A Fig. 5 apresenta a nova versão da microrrede, baseada na solução de armazenamento flexível da SMA.

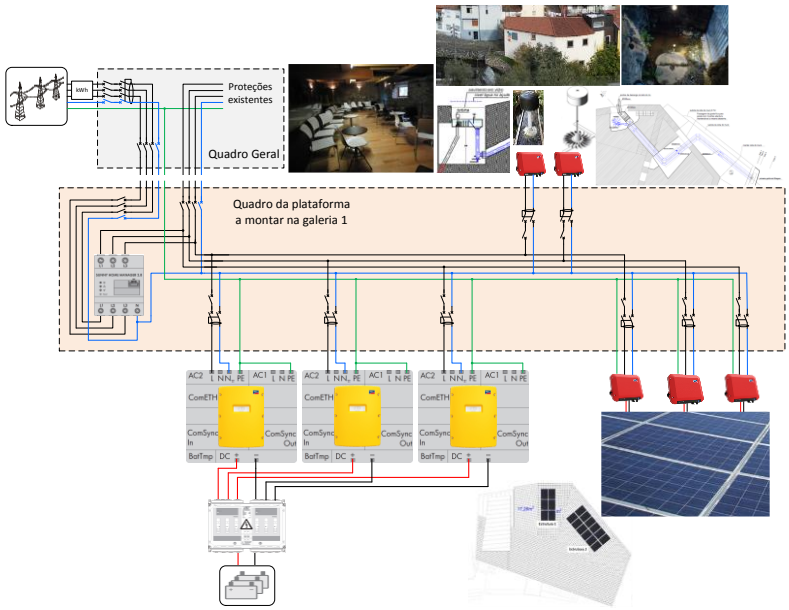


Fig. 5. Microrrede para a Casa da Seda, com integração de produção hídrica e fotovoltaica baseada no sistema de armazenamento flexível da SMA.

O *core* deste sistema consiste no inversor Sunny Island e no sistema de gestão de energia, o Sunny Home Manager 2.0. O projeto da Casa da Seda contará com um cluster formado por três conversores bidirecionais Sunny Island 4.4M, na configuração mestre-escravo, cinco inversores Sunny Boy 1.5-1VL-40, um Sunny Home Manager 2.0, 24 baterias A602/625 da Sonnenschein Solar, 18 módulos fotovoltaicos VBHN295SJ46 da Panasonic, uma roda de água horizontal, uma turbina de hélice, quadro elétrico e circuitos de proteção e seccionamento. Embora o Sunny Home Manager 2.0 possua as funções do Energy Meter integradas, para os geradores da roda de água horizontal e da turbina, poderão ser instalados dois Energy Meter da SMA, conectados via *speedwire* ao Sunny Home Manager 2.0, para que este possa controlar o fluxo de energia da produção hídrica na microrredes. Na eventualidade de se utilizar inversores de outro

fabricante, que não a SMA, a solução final vai depender dos testes laboratoriais em curso, de ligação dos geradores à microrrede.

As principais funções do Sunny Home Manager 2.0 serão medir, gerir e tomar decisões através de três funcionalidades: *energy balance*, *load balance and control* e *battery management*. Com este equipamento será possível gerar recomendações para controlar as cargas, registar a energia PV e pico-hídrica gerada, receber previsões meteorológicas atualizadas via *internet*, evitar a injeção de energia na rede, monitorizar a energia elétrica comprada à rede, determinar a quantidade de energia consumida e criar perfis de carga, que podem ser diferentes para cada dia da semana. Além da cablagem necessária para a rede trifásica e de uma rede local *speedwire* para comunicação entre os equipamentos SMA, é necessário que o utilizador configure alguns parâmetros diretamente em cada equipamento e utilize a plataforma Sunny Portal da SMA através da *internet*, sendo este recurso o mais favorável, permitindo a configuração e monitorização remotas.

Além de um controlo automático das cargas que poderão ser ligadas em dias e horários específicos, através da utilização de tomadas inteligentes, SP-2101W, também poderão ser ligadas e desligadas manualmente cargas especiais porque o Sunny Home Manager 2.0 é capaz de prever situações baseadas no histórico de consumo e no fluxo de energia e indicar momentos de maior produção ou disponibilidade de eletricidade a baixo custo a partir da rede pública. Como estas tomadas são controladas via radiofrequência, é necessária uma rede local de comunicação para o sistema de gestão de energia.

Aproveitando as funcionalidades do sistema, através da função *energy balance* é possível acompanhar o consumo de energia e o estado das baterias, limitar a potência injetada na rede, prever consumo e geração PV e otimizar o consumo manual e inteligente. Pelo *load balance and control* é possível monitorizar o tempo de operação de cargas, o mix de energia no sistema e programar em que momento poderão ser ligadas cargas não essenciais e/ou deslastráveis ao menor custo.

Ao ativar a função *storage management* do Sunny Home Management no Sunny Portal, são obtidas informações quanto ao estado de carga e de saúde das baterias. Isto garante que a carga das baterias pelo Sunny Island seja baseada na previsão. Se não for ativada, a gestão ficará por conta do Sunny Island.

Como a cidade de Bragança apresenta, na maior parte do ano. temperaturas abaixo de 20°C, e no inverno são atingidas temperaturas que podem chegar a -10°C, estas condições obrigam o operador do sistema a acompanhar o funcionamento e o ciclo de carga e descarga das baterias com maior atenção, em função das solicitações do Sunny Island. A parametrização do sistema de armazenamento em função da temperatura, com os valores propostos pelo fabricante das baterias, será importante para não prejudicar o seu tempo de vida útil.

Atendendo ao requisito de não injetar potência na rede quando houver produção excessiva de eletricidade, se as baterias estiverem carregadas e não se puder utilizar uma carga elétrica para consumo, como por exemplo do sistema de climatização, o Sunny Home Manager sinaliza ao Sunny Island que a frequência da microrrede deve ser aumentada a fim de os inversores PV começarem a reduzir sua produção, desde 100% até zero. Este controlo designado por *Frequency Shift Power Control* – FSPC

[11] permite que os inversores PV regulem a produção em função do consumo. Nestas situações, o controlo de fluxo de energia é feito através do aumento da frequência da microrrede [11]. Assim, evita-se a carga das baterias baseada na previsão de geração PV e o excesso pode ser armazenado para suprir uma necessidade posterior da microrrede. Toda esta comunicação ocorre dentro do sistema elétrico trifásico da microrrede e não pela rede de telecomunicações porque todos os conversores e inversores especificados possuem um *firmware* compatível com essa topologia de controlo. Assim, se a versão do *firmware* do Sunny Home Management for 1.11.4.R, este encarrega-se da limitação de injeção de energia ativa à rede pública. Caso a versão seja 1.13.x.R, é o Sunny Island responsável por esta função.

3.2.1 Características do sistema fotovoltaico

No pressuposto da configuração definida na secção 3.3, a especificação dos módulos PV foi realizada atendendo ao custo e à tecnologia recente. Assim, foram selecionados os módulos da Panasonic, modelo VBHN295SJ46, da série HIT [12].

São utilizadas 3 fileiras (*strings*), compostas por 6 módulos PV cada, em duas áreas do telhado, orientadas para o sul e com inclinação de 12º (Fig. 6). A colocação das fileiras, em função da orientação das áreas disponíveis, permite distribuir a energia PV produzida durante o dia e evitar sombreamentos. A simulação realizada no Sunny Design permite estimar um autoconsumo PV de 7,14 MWh/ano. Os inversores instalados serão três Sunny Boy 1.5-1VL-40.

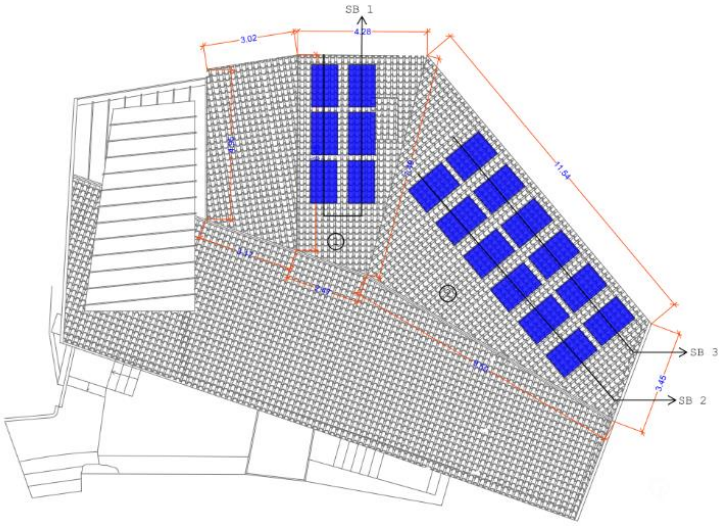


Fig. 6. Distribuição dos 18 módulos fotovoltáicos no telhado.

3.2.2 Características da roda de água horizontal

Os aproveitamentos hidroelétricos de pequena escala apresentam um enorme potencial ainda inexplorado e com muitas vantagens [13]-[19]. Estes sistemas, com potências até 5 kW são designados por pico-hídricos [20] [21]. Quando ligados à rede elétrica através de equipamentos convencionais são uma solução emergente para um significativo número de aplicações [14]-[18]. Por todo o mundo, os moinhos de água tiveram um papel relevante no desenvolvimento das populações e constituem um património histórico a conservar. A Casa da Seda, em Bragança, é um bom exemplo.

Junto à Casa da Seda existe um dique construído aquando da requalificação daquela zona ribeirinha do rio Fervença. Por outro lado, a reconstrução do edifício conservou a galeria onde outrora existiu um moinho, bem como de algumas condutas de água originais. Considerando o recurso endógeno e a infraestrutura disponíveis, e tendo em conta que a Casa da Seda é um museu de divulgação de ciência, o projeto em curso pretende conciliar a recuperação do património arquitetónico e cultural do edifício com conservação do ambiente e a produção de energia a injetar na microrrede. Desta forma, pretende-se que a Casa da Seda possa funcionar como uma atividade regular de demonstração de sistemas mais sustentáveis, em cidades inteligentes, para os visitantes e um caso de estudo da os estudantes do Instituto Politécnico de Bragança.

Neste contexto, o projeto inclui dois sistemas pico-hídricos: uma roda de água horizontal, a construir com novos materiais e para emular o antigo moinho, e uma turbina de hélice de baixa queda. Para a roda de água, dispõe-se de uma cota 3,5 m e o caudal previsto é de 20 l/s. Em pequenas turbinas hídricas o rendimento é raramente superior a 80 %. De acordo com [14], o rendimento global espectável é de aproximadamente 50 %. Assim, a potência elétrica estimada para a roda de água, obtida através de

$$P = \eta g h Q \tag{1}$$

onde η é a rendimento global, que contempla todas as perdas no sistema, a aceleração da gravidade g = 9,8 m/s^2, h é altura de queda bruta de 20 m, e Q um caudal de 3,5 l/s, produz, aproximadamente, 340 W. Considerando uma potência útil, a injetar na microrrede, não superior a 300 W, e considerando uma utilização anual da potência instalada de, sensivelmente 5100 h, de forma a considerar os períodos em que o recurso primário não estará disponível e indisponibilidade do sistema para tarefas de manutenção, a energia produzida será superior a 1,5 MWh/ano. O primeiro protótipo da roda de água foi construído em laboratório com o objetivo de obter uma primeira estimativa da eficiência (e da potência) e da velocidade de rotação, para melhor especificar o gerador e a sua ligação à microrrede. O protótipo, apresentado nas Fig. 7 e 8, foi construído à escala real e tem em conta os requisitos reais de projeto, nomeadamente, as restrições geométricas impostas pelas instalações da Casa da Seda, designadamente o diâmetro máximo.

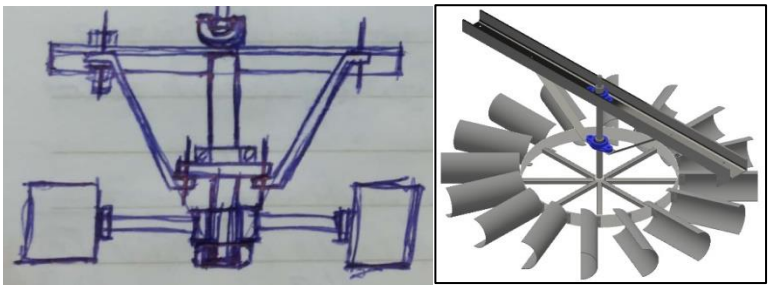


Fig. 7. Croqui e desenho em CAD do protótipo e da sua estrutura

Com o protótipo instalado no Laboratório de Geotecnologia do Instituto Politécnico de Bragança (Fig. 8), a sua estrutura superior de sustentação está assentada sobre o tanque. Um eixo vertical é apoiado nesta estrutura de modo a limitar a sua oscilação horizontal e, com a roda livre para girar no interior do tanque. São posicionados jatos d'água, devidamente direcionados para o ataque das pás. A água é obtida a partir de um reservatório a uma altura específica 3,5 m, ou seja, a mesma cota disponível na Casa da Seda.



Fig. 8. Protótipo e *layout* laboratorial para o teste da roda de água.

3.2.3 Características da turbina pico-hídrica

Não é a primeira vez que o Rio Fervença é objeto de pesquisa do IPB como um potencial microgeração de eletricidade ao utilizar turbinas pico-hídricas. Através do projeto VERCampus [22] foram analisadas em laboratório e implementadas, em contexto real, soluções para pico-hídricas baseadas na turbina ZD2.5-1.0DCT4-Z, geradores síncronos de ímanes permanentes e inversores eólicos (Windy Boy WB 1200) para conexão à rede. Com base na experiência adquirida e pelas características locais e requisitos de instalação, a turbina a ser instalada no projeto da Casa da Seda será do tipo hélice de baixas quedas, de 1 m até 5 m, com caudais até 56 l/s, modelo LH450HP da PowerSpout, que integra um gerador de ímanes permanentes com potência de 1421 W e velocidade nominal 1536 rpm. Para as condições nominais de

funcionamento da turbina, queda de 5 m e caudal de 56 l/s, a tensão DC é 212 V em carga e 450 V em vazio. A corrente nominal é de 6,7 A.

Sendo esta, uma turbina de reação, a hélice precisa de estar submersa para poder funcionar [14]. Será utilizada a infraestrutura já existente do antigo moinho, com a instalação de tubagens e de canais para a instalação da turbina. Estima-se que o local tenha caudal suficiente para produção de energia durante 70% do ano, considerando os períodos de baixo caudal no rio e de paragem para manutenção. Com uma altura de 5 m resulta, então, uma produção de energia, estimada a partir de (1), aproximadamente de 26 kWh/dia [7], já considerando 25% de perdas derivadas à curva no tubo de descarga. A produção anual estimada é de 6,5 MWh/ano.

A ligação da turbina pico-hídrica à microrrede será feita utilizando soluções inovadoras com inversores fotovoltaicos convencionais [15]-[18]. O inversor fotovoltaico a utilizar será o Sunny Boy 1.5-1VL-40 da SMA. Para evitar sobretensões devidas ao funcionamento em vazio da turbina, será necessário utilizar um circuito de proteção contra sobretensões [15]-[18].

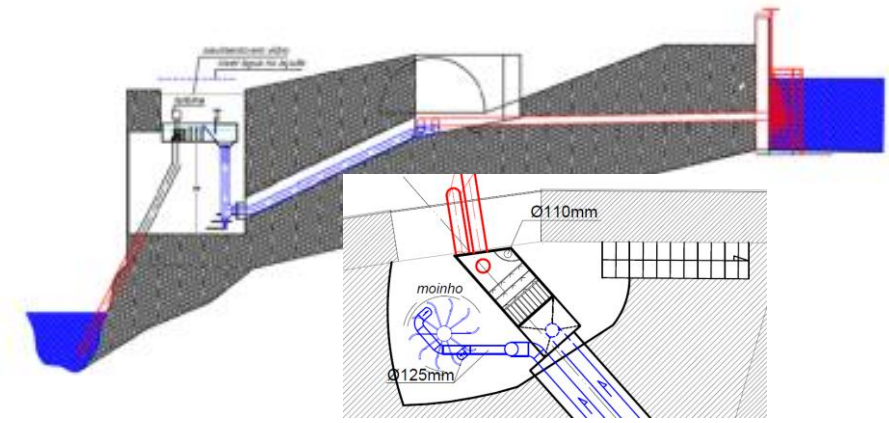


Fig. 9. Corte transversal do terreno e detalhe da vista superior do dique, tubagem e galeria com a roda de água horizontal do moinho e turbina.

3.2.4 Emulação do sistema de conversão de energia utilizando Inversor PV

Ao montar um sistema [19] capaz de emular turbinas, tanto hídricas quanto eólicas, para uso didático e de investigação (Fig. 10), pretendeu-se analisar integração de geração hídrica em microrredes utilizando inversores fotovoltaicos convencionais, amplamente disponíveis no mercado e a baixo custo.

O sistema contém uma interface com utilizador desenvolvido no software LABVIEW, um inversor de frequência (ACS 600), que aciona um motor de indução acoplado com um gerador síncrono de ímanes permanentes, uma ponte retificadora, um circuito de proteção e o inversor fotovoltaico ligado à rede ou à microrrede existente no laboratório.

A ponte retificadora é utilizada para a retificação do sistema trifásico da tensão do gerador e o circuito de proteção é utilizado para evitar sobretensões em caso de falha na rede, por exemplo.

Este sistema permite o desacoplamento de frequência entre o gerador e a rede, de forma que o gerador possa ser acionado a velocidade variável, aumentando a eficiência do sistema e fazendo com que o inversor fotovoltaico possa injetar a potência na rede [16]. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Sistemas Eletromecatrónicos do IPB com os inversores Sunny Boy 2100, Sunny Boy 1.5-1VL-40 e o Omnik-2k-TL2.

Sempre que o inversor se desconectar da rede, ou durante as colocações em serviço, após paragens, uma vez que os inversores podem demorar mais de 1 minuto a iniciar a injeção de energia na rede, o circuito de proteção dissipa a potência do gerador numa resistência externa, prevenindo assim sobretensões perigosas [16]. O inversor fotovoltaico encarrega-se de fazer o seguimento do ponto de potência máxima, neste caso do gerador hídrico, e injetar a energia na rede [15]-[18].

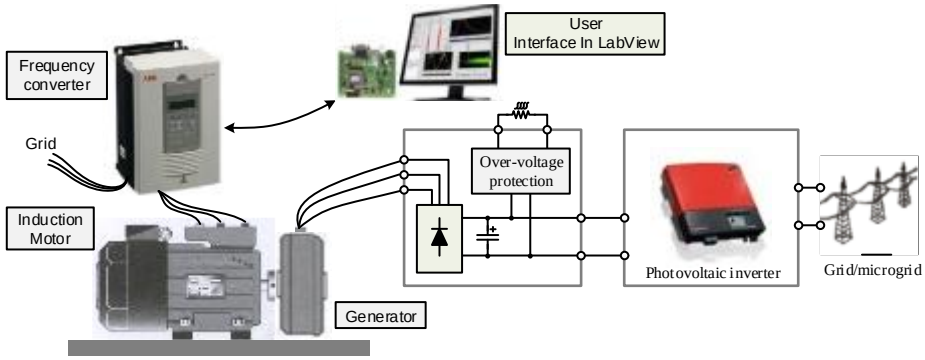


Fig. 10. Diagrama da emulação do gerador [19].

4 Resultados

Estima-se que a energia produzida por ano seja de 7,14 MWh de geração PV, com base nos dados de produção PV no local, 1,5 MWh devido à roda de água horizontal e 6,5 MWh da turbina, atingindo 15,14 MWh, praticamente 16,7 MWh, que é o valor do último consumo anual registrado (2016). Por outro lado, a complementaridade da produção hídrica com a produção PV contribui para a otimização das quotas de autoconsumo e de autossuficiência.

A solução para a integração da roda de água e da turbina pico-hídica consiste em ligar a tensão retificada do gerador diretamente à entrada de inversores fotovoltaicos, que realizam a interface com a microrrede. Para isso, torna-se necessário utilizar um circuito de proteção para limitar a velocidade do gerador e a tensão à entrada do inversor, em situações transitórias. Assim, tanto o Sunny Boy 1.5-1VL-40 como outros

inversores testados apresentaram resultados que garantem a injeção de potência hídrica na microrrede [16].

5 Conclusão

Este artigo apresenta o estado atual do desenvolvimento e implementação de uma microrrede na Casa da Seda, do Centro Ciência Viva de Bragança, Portugal. Este trabalho está a ser implementado no âmbito do Projeto SilkHouse - *Development of a smart microgrid based on renewable energy sources and a monitoring system for the House of Silk*, financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia. O projeto visa transformar a Casa da Seda, um museu dedicado à disseminação de ciência, num edifício autossustentável em termos médios anuais. O projeto da Casa da Seda decorre dos resultados de projetos e estudos anteriores baseados nas tecnologias da SMA (Sunny Island) e da PowerSpout (turbinas pico-hídricas para baixas quedas), e na utilização de geradores síncronos de ímanes permanentes ligados à rede através de inversores fotovotaicos convencionais. A solução desenvolvida consiste na instalação de uma microrrede inteligente, baseada no sistema de armazenamento flexível da SMA. A microrrede tem como fontes de energia os recursos endógenos e renováveis locais, designadamente, sistemas fotovoltaicos e pico-hidricos. Estes últimos consistem numa turbina de hélice de baixa queda e numa roda de água horizontal, a instalar no local onde existiu um moinho e cuja infraestrutura foi conservada. A microrrede tem, ainda, um banco de baterias para aumentar a quota de autoconsumo, uma vez que estará ligada à rede elétrica de serviço público, mas sem injeção de energia na mesma.

A Casa da Seda, como museu de divulgação de ciência, pretende ser um modelo real de dissiminação deste tipo de soluções, servido de referência para futuras casas eficientes, em cidades inteligentes.

Agradecimentos

Os autores agradecem à FCT-Fundação para a Ciência e a Tecnologia o apoio financeiro concedido no âmbito do projeto SilkHouse, ao Município de Bragança o apoio na implementação física do projeto, o Centro Ciência Viva de Bragança, designadamente à Ivone Fachada e Estefania Gonçalves a colaborarão nas atividades realizadas, à ESTiG-IPB pelo apoio nos testes laboratorias, ao Rui Oliveira os desenhos e apoio na memória descritiva, ao José Batista, Wellington Maidana, Vitor Gomes, Jorge Paulo e Abílio Marcelo, o apoio nas atividades realizadas.

Referências

1. A. Hirsch, Y. Parag e J. Guerrero. “Microgrids: A review of technologies, key drivers, and outstanding issues”. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 90, pp. 402-411, 2018.

2. Q. Fu, L.F. Montoya e A. Solanki, "Microgrid Generation Capacity Design with Renewables and Energy Storage Addressing Power and Quality and Surety", Microgrid Generation Capacity Design with Renewables, December 2012, pp. 2019-2027.
3. SMA. Sunny Island System Guide - System Solutions for Reliable Off-Grid Power Supply. http://www.termsenergy.cz/content/files/text20141219102338/sma-offgrid-sunny-island.pdf 2014 last accessed 2018/09/08.
4. V. Leite, J. Batista e O. Rodrigues. "VERCampus – Live Park of Renewable Energies" International Conference on Renewable Energies and Power Quality, 28-20 Março 2012
5. IPB. Ver Campus – Campus de Energias Renováveis. http://vercampus.ipb.pt/portal/page?_pageid=495,291936&_dad=portal&_schema=PORTAL last accessed 2018/09/08.
6. V. Leite, A. Ferreira, J. Batista e J. Couto. "Analysis of the Operation of a Microgrid with Renewable Distributed Generation". III Congreso Iberoamericano sobre Microrredes con Generación Distribuida de Renovables, 1-2 Dezembro, 2015.
7. W. Maidana, V. Leite, A. Ferreira, L. Queijo, J. Batista, J. Bonaldo, E. Gonçalves. "Design of a Self-sustainable System Based on Renewable Energy Sources for a Small Museum of Science Dissemination - the House of Silk", III Congresso Ibero-Americano de Empreendedorismo, Energia, Meio Ambiente e Tecnologia, 12-15 Julho 2017.
8. SMA FLEXIBLE STORAGE SYSTEM - System description. SI44M-80H-12-FSS-IA-en-10, Version 1.0. 2017 http://files.sma.de/dl/30486/SI44M-80H-12-FSS-IA-en-10.pdf last accessed 2018/06/19.
9. SMA SMART HOME - Planning Guidelines. SI-HoMan-PL-en-50, Version 5.0. 2017 https://zerohomebills.com/wp-content/uploads/Planning-Guidelines-SMA-SMART-HOME-The-System-Solution-for-Greater-Independence.pdf last accessed 2018/06/19.
10. ZEP. Solar Roof Tiles - Technical Specifications. https://www.zepbv.nl/technical-specifications last accessed 2018/05/17.
11. SMA. PV Inverters - Technical Information. http://files.sma.de/dl/7910/SB-OffGrid-TI-US-en-19.pdf last accessed 2018/06/11
12. Panasonic. Photovoltaic module HIT VBHN295SJ46 https://eu-solar.panasonic.net/cps/rde/xbcr/solar_en/VBHN295SJ46_EN.pdf last accessed 2018/05/17.
13. R. W. Fox, A. T. McDonald, P. J. Pritchard e J. W. Mitchell, Fox and McDonald's Introduction to fluid mechanics, 9th edition. Hoboken, NJ: Wiley, 2015.
14. A. Harvey. Micro-Hydro Design Manual: a guide to small-scale water power schemes. Intermediate Technology Publications, 1993.
15. V. Leite, A. Ferreira, J. Couto e J. Batista, "A Pratical Approach for Grid-connected Pico-hydro Systems using Conventional Photovoltaic Inverters", IEEE International Energy Conference (ENERGYCON), 4-8 abril 2016.
16. V. Leite, A. Ferreira, J. Couto e J. Batista, "Compatibility Analysis of Grid-connected Pico-hydro Systems using Conventional Photovoltaic Inverters", 18th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE 2016), Karlsruhe, Germany, 6-8 setembro 2016.
17. V. Leite, A. P. Ferreira, J. Couto e J. Batista, "Pico-hydro Systems: Microgrid-Connection approaches", IV Congreso Iberoamericano Sobre Microrredes con Generación Distribuida de Renovables, Concepción, Chile, 27-28 outubro 2016.

18. V. Leite, A. P. Ferreira, J. Couto e J. Batista, “Grid-connection approaches for pico-hydro systems.” II Congresso Ibero-Americano de Empreendedorismo, Energia, Meio Ambiente e Tecnologia - CIEEMAT 2016, 8-11 novembro 2016.
19. K. Brito. “Plataforma para Emulação de sistemas Pico-hídricos ligados à Rede Elétrica, utilizando Inversores Fotovoltaicos Convencionais”. Dissertação de mestrado apresentada à Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Bragança, 2016.
20. M. Basar, A. Ahmad, N. Hasim, K. Sopian. “Introduction to the pico hydro power and the status of implementation in Malaysia”. In 2011 IEEE Student Conference on Research and Development, SCOReD 2011.
21. K. Sopian, J. Razak. “Pico hydro: clean power from small streams”. In Proceedings of the 3rd World Scientific and Engineering Academy and Society International Conference on Renewable Energy Sources, Tenerife, Spain (Vol. 13). 2009.
22. V. Leite, T. de Figueiredo, T. Pinheiro, A. Ferreira e J. Batista. “Dealing with the Very Small: First Steps of a Picohydro Demonstration Project in an University Campus”. International Conference on Renewable Energies and Power Quality, 28-20 Março 2012

Hacia un campus sostenible: El Proyecto RES2+U de la UPM

Gregorio López[1], Manuel Alvarez-Campana[1], Manuel Almestar[1], Carmen Avilés[1], Domingo Martín[1], Francesca Olivieri[1], Gregorio Romero[1]

[1] Universidad Politécnica de Madrid, Calle Ramiro de Maeztu, 7, 28040 Madrid

Resumen. Según la revisión de 2018 del informe "Perspectivas Mundiales de Urbanización" elaborado por la Organización de Naciones Unidas (ONU), hoy en día el 55% de la población mundial vive en áreas urbanas y se prevé que dicha proporción crecerá hasta un 68 % para el año 2050. Las denominadas *ciudades inteligentes* deben por tanto regirse por los principios de eficiencia y sostenibilidad para que sean lugares no sólo habitables sino saludables para el elevado número de personas que se espera vivan en ellas. Para afrontar este problema se requiere de plataformas multidisciplinares e intersectoriales y la Universidad está llamada a jugar un papel fundamental al respecto. En concreto, los campus universitarios representan el lugar idóneo donde experimentar y evaluar propuestas relativas a eficiencia y sostenibilidad que luego puedan escalarse a las ciudades en las que, muchos de ellos, se integran, surgiendo así el concepto de *campus as a living lab*.

Este artículo presenta el proyecto Responsables, Sostenibles y Universitarios (RES2+U): un proyecto financiado con fondos propios de la UPM que pretende seguir dando pasos hacia un campus UPM más sostenible, así como sentar las bases para poder acometer proyectos de mayor envergadura. Este proyecto representa un buen ejemplo de la importancia de un enfoque multidisciplinar a la hora de afrontar problemas tan complejos como la eficiencia y sostenibilidad en entornos urbanos, integrando más de una decena de iniciativas enmarcadas dentro de este ámbito lideradas por profesores y alumnos de distintas Escuelas de la UPM.

Palabras clave: *Campus as a living lab*, Ciudades Inteligentes, Innovación, Sostenibilidad.

1 Introducción

Según la revisión de 2018 del informe "Perspectivas Mundiales de Urbanización" [1], elaborado por el Departamento de Asuntos Económicos y Sociales (DESA) de la Organización de Naciones Unidas (ONU), hoy en día el 55% de la población mundial vive en áreas urbanas y se estima que dicha proporción crecerá hasta un 68 % para el año 2050. En términos absolutos, esto supondría que para el 2050 haya 2,5 billones de personas más viviendo en áreas urbanas, el 90 % de las cuales se localizaría en Asia y África.

El informe de la DESA señala además que se ha pasado de 10 “megaciudades” (ciudades con más de 10 millones de habitantes) a nivel mundial en 1990, a 28 en 2014, y prevé que en el año 2030 se llegue a 43. Sin embargo, algunas de las aglomeraciones urbanas que crecen más rápidamente son ciudades con menos de 1 millón de habitantes, viviendo actualmente cerca de la mitad de la población mundial en asentamientos con menos de 500.000 habitantes, frente al 12,5 % que vive en “megaciudades”.

Este panorama obliga a que las ciudades del futuro deban regirse por los principios de eficiencia y sostenibilidad para que sean lugares no sólo habitables sino saludables para el elevado número de personas que se espera vivan en ellas. Ése debe ser sin lugar a dudas el objetivo de las llamadas *ciudades inteligentes*, desvinculando dicho paradigma exclusivamente del despliegue y utilización de nuevas tecnologías. Por ejemplo, una ciudad que presente niveles de contaminación que provoquen problemas de salud en sus habitantes jamás podrá considerarse una *ciudad inteligente*, independientemente de lo intensiva en el uso de tecnología que sea.

Para afrontar un problema tan complejo es necesario colaborar a través de plataformas multidisciplinares e intersectoriales que aúnen diferentes áreas de conocimiento, diferentes puntos de vista y, en definitiva, a los diferentes actores involucrados a todos los niveles (instituciones y ciudadanos, industria y academia, etc.).

La Universidad está llamada a jugar un papel fundamental en este proceso. En concreto, los campus universitarios representan el lugar idóneo donde experimentar y evaluar propuestas relativas a eficiencia y sostenibilidad que luego puedan escalarse a las ciudades en las que, muchos de ellos, se integran, surgiendo así el concepto de *campus as a living lab* [2],[3].

La Universidad Politécnica de Madrid (UPM) presenta un gran potencial en este sentido. Se trata de una universidad con escuelas que cubren prácticamente todas las ramas de la Ingeniería junto a Arquitectura y Ciencias de la Actividad Física y del Deporte. Además, si bien todos los campus que la componen son interesantes desde el punto de vista de *campus as a living lab*, el de Moncloa presenta una serie de características que lo hacen destacar en este sentido a nivel internacional: como muestra la Fig. 1, se encuentra dentro del núcleo urbano de Madrid, cuenta con la actividad diaria de más de 40.00 personas (lo que lo hace equiparable a algunas capitales de provincia españolas) y es compartido con la Universidad Complutense, que complementa el conocimiento de la UPM abarcando la mayor parte de las Ciencias Sociales y Humanidades.



Fig. 1. Campus de Excelencia Internacional (CEI) de Moncloa en Madrid (España) [4]

Por estos motivos, la UPM ha sido pionera a nivel nacional en este ámbito, lanzando en su momento el Máster en City Sciences [5] y la iniciativa UPM City of the Future [6], y pretende seguir siéndolo. Para ello, actualmente se llevan a cabo diversas iniciativas. Este artículo se centra en una de ellas: el proyecto "Responsables, Sostenibles y Universitarios" (RES2+U), financiado con fondos propios dentro del programa "XVIII Convocatoria para Acciones para contribuir al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)", y que pretende seguir dando pasos hacia un campus UPM más sostenible, así como sentar las bases para poder acometer proyectos de mayor envergadura.

El resto del artículo se estructura de la siguiente manera. La sección 2 resume el contexto y algunas iniciativas especialmente relevantes relacionadas con el proyecto RES2+U. La sección 3 describe los principales objetivos del proyecto, cómo se organiza y los principales resultados que se espera obtener del mismo. Por último, la sección 4 presenta las principales conclusiones y algunos de los próximos objetivos que se pretenden acometer.

2 Iniciativas relacionadas

Los retos actuales son cada vez más complejos y su resolución es una carrera contra reloj. Las Universidades deben trabajar los distintos niveles de la innovación desde proyectos que proponen soluciones puntuales a temas transversales en escenarios futuros poco claros. El trabajar en plataformas permite a los distintos actores potencializar sus actividades, abordar trabajos interdisciplinares, optimizar sus recursos, generar sinergias entre los nodos, escalar los proyectos y tener un alcance mayor que de haberse realizado intervenciones puntuales que pueden quedarse en únicamente experiencias para los intervinientes, pero no generan un impacto sostenido ni una sostenibilidad en el tiempo. Bajo este enfoque, algunas universidades en el mundo han acogido este concepto de *plataforma* desarrollando programas estables en el que se puedan enmarcar múltiples iniciativas que permitan generar todas las características ya mencionadas.

Entender el campus universitario como una plataforma conlleva un enfoque organizativo, tecnológico y socioeconómico integrado en el que la Universidad utiliza activos e instalaciones para investigar y probar tecnologías o servicios innovadores por, con y para su comunidad. Mediante estos procesos se genera un marco común de trabajo donde la co-creación es pieza fundamental para la solución de problemáticas complejas que "monodisciplinarmente" no han podido ser resueltas.

Entre algunos ejemplos de universidades que ya vienen desarrollando y trabajando en estos ecosistemas podemos resaltar la Green Office de la TUDelft [7] en Holanda, el *campus as a living lab* de la Universidad de British Columbia [8] en Canadá o la iniciativa de sostenibilidad de Harvard [9] en EEUU, que desarrollan un trabajo de plataforma abierta donde la interdisciplinariedad es la base para el abordaje de problemas, de la mano de la investigación y modelos educativos innovadores, donde el alumnado, el profesorado y la administración pública juegan un rol fundamental.

Asimismo, El Centro de inteligencias Colectivas del *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) [10] explora cómo las personas y los ordenadores pueden generar conexiones para que conjuntamente actúen de forma más inteligente de la que podrían hacer por sí mismas, aprovechando todas las posibilidades que esto permite. Thomas Malone, director fundador del Centro, en su libro Superminds [11] manifiesta cómo los grupos de personas que trabajan juntos en *superminds*, como jerarquías, mercados, democracias y comunidades, han sido responsables de casi todos los logros humanos en negocios, gobierno, ciencia y más. Y estos grupos humanos colectivamente inteligentes están a punto de ser mucho más inteligentes.

Por último, desde la UPM se viene desarrollando el Living LAb Madrid. Ésta es una plataforma de escucha de problemáticas de la ciudad y de la comunidad universitaria que promueven la co-creación, a través de la inteligencia colectiva de prototipos y pilotos que den respuesta a los problemas detectados, basados en la experimentación, demostración y rediseño iterativo de las soluciones co-creadas, buscando propuestas de servicios y políticas públicas probadas en el campus. La plataforma relaciona múltiples actores de diversos ámbitos con diferentes perspectivas, tales como organizaciones de sector público, sector privado, sociedad civil o ciudadanía, entre otros. El Living LAb está enfocado en el desarrollo del Plan A de Calidad del Aire y Cambio Climático del Ayuntamiento de Madrid.

Estas experiencias son la base teórica para la generación del Proyecto RES2+U que busca ser el integrador de las distintas iniciativas en el Campus en pro de un sistema holístico. Desde la UPM, se vienen generando muchas iniciativas que se direccionan hacia este modelo, buscando ser catalizadores de ideas innovadoras y sostenibles donde todas y todos estemos vinculados.

3 El Proyecto RES2+U de la UPM

El 8 de enero de 2018, la UPM publicó la "XVIII Convocatoria para Acciones para contribuir al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)", cuyo objetivo es seguir impulsando la investigación y la innovación para el desarrollo sosteni-

ble. Esta convocatoria, que tradicionalmente estaba enfocada a proyectos de cooperación internacional, este año por primera vez ha incluido entre sus objetivos un objetivo específico enfocado a la sostenibilidad en los campus universitarios de la UPM.

De hecho, uno de los objetivos generales de la convocatoria es la consecución de soluciones para lograr un campus sostenible, de acuerdo con los principios que inspiran la Agenda 2030 de ODS [12], [13]. En concreto, la convocatoria está enfocada a actividades de desarrollo de soluciones tecnológicas para el campus, acciones de implicación de alumnos, profesores y personal en la UPM.

Esto es debido a que, como ya se ha comentado, los campus universitarios son espacios particularmente indicados para impulsar las innovaciones y cambios de comportamiento que están en la base de la consecución de los ODS. De hecho, los campus universitarios son "lugares singulares" donde actores muy diversos de la sociedad civil, de la administración pública y de la industria encuentran un espacio neutral para co-crear en un ambiente de simetría y confianza.

El proyecto RES2+U, que ha sido financiado en el ámbito de esta convocatoria, se conforma como una plataforma para la dinamización y la implementación de la Responsabilidad Social Universitaria a través de la cual se pretende conseguir la integración de los componentes sociales, tecnológicos y medioambientales como principal aporte a la consecución de los ODS.

El proyecto RES2+U agrupa los ODS, mostrados en la Fig. 2, en 4 líneas de acción: Educación para la transformación (ODS 4, 5, 9, 10 y 12), Energía y medio ambiente (ODS 6, 7, 9, 11, 13, 14 y 15), Innovación y Desarrollo (ODS 1, 2, 3, 8, 9 y 16) y Alianza Multiactor (ODS 17). Estos grupos establecen el marco para la interdisciplinariedad y el trabajo multiactor.



Fig. 2. Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) definidos por la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) [14]

Asimismo, la plataforma RES2+U tiene como objetivo ser un aporte al Marco de la Estrategia de Sostenibilidad de la UPM como demostrador de buenas prácticas y punto de referencia de evidencias científicas para la toma de decisiones y aplicaciones a políticas públicas. Concretamente, las líneas de actuación del proyecto están ligadas a:

- Línea 1. Aprobar y aplicar normativas que conviertan a la UPM en una Universidad más sostenible.
- Línea 2. Mejorar la eco-eficiencia y avanzar en la desmaterialización de la Universidad.
- Línea 3. Urbanismo, ordenación y gestión del medio y patrimonio urbanos de la UPM.
- Línea 4. Movilidad sostenible.
- Línea 5. Concienciación y sensibilidad ambiental de la comunidad universitaria de la UPM.
- Línea 6. Sostenibilidad ambiental como objeto de estudio en los programas académicos, la investigación y transferencia de conocimiento de la UPM.

El proyecto pretende también ser una herramienta para fomentar la colaboración entre la UPM y el Ayuntamiento de Madrid, sobre todo impulsando los ámbitos estratégicos 3 (Profundización en la construcción de ciudades y comunidades sostenibles) y 4 (Profundización en un modelo económico y social sostenible) propuestos por el Ayuntamiento de Madrid en su “Marco Estratégico Para La Política De Ciudadanía Global Y Cooperación Internacional De La Ciudad De Madrid (2018-2021)”.

La plataforma RES2+U agrupa diferentes iniciativas presentadas por profesores de la UPM con distinto grado de avance y ámbito de trabajo. La Tabla 1 muestra un resumen de dichas iniciativas.

Tabla 1. Iniciativas comprendidas dentro de la plataforma RES2+U

Nombre	ID	Escuela	Breve descripción
Mapa de I+D	1	ETSII	Pretende ofrecer información georreferenciada de los equipamientos, servicios y recursos de la UPM con el objetivo de aumentar la eficiencia en el uso y en su aplicación.
Out of silence	2	ETSAM	Ofrece la monitorización, visibilización y movilización vinculada con problemas de exclusión social en Madrid.
CAMINOSsinplástico (UPMsinplástico)	3	ETSICCP	Pretende eliminar el plástico de un solo uso –botellas de agua, menaje de cafetería, entre otros- en la UPM.
***App* de riego**	4	ETSIAAB	Propone el desarrollo de una aplicación móvil de riego de áreas verdes en la que se pueda consultar la cantidad de agua que hay que aportar.
MESECU	5	ETSIME	Mejora de la Sostenibilidad Energética del Campus Universitario a través de la monitorización de espacios con sensores de bajo coste. Cuenta con sensores basados en Raspberry Pi que miden temperatura, humedad y presión atmosférica.
Casas sostenibles	6	ETSIAAB	Propone aprovechar información sobre clima en edificios, poner en red y mejora.
Especies arbóreas	7	ETSIAAB	Propone concienciar, a través de las TIC, sobre el valor del arbolado para lograr unas ciudades sostenibles
Monitorización de edificios	8	ETSIE	Red de monitorización de los edificios existentes en el campus. Actualmente cuenta con sensores para monitorización ambiental (temperatura y humedad) basados en Raspberry Pi y sensores para monitorización de CO2 basados en Arduino, así como con una centra meteorológica.
Espacios experimentales	9	ETSAM/ITD	Redes de monitorización de edificios que cuenta con sensores de flujo de calor y de temperatura superficial. Esta iniciativa también propone mejora de eficiencia a través de instalación de paneles fotovoltaicos en cubiertas de edificios.
Smart CEI Moncloa [15]	10	ETSIT	Plataforma IoT desplegada en las Escuelas del Campus de Moncloa que actualmente ofrece servicios de monitorización de flujo de personas, mediante *Wi-Fi tracking*,usando dispositivos basados en Raspberry Pi, y de monitorización medioambiental (temperatura, humedad, luminosidad, ruido, CO y NO2), utilizando dispositivos SCK (*Smart Citizen Kit*) basados en Arduino.
SecondHand	11	ETSII	*Marketplace* para alumnado utilizado actualmente en la ETSII.
Global Challenge	12	Alumnos UPM	Programa de implicación de estudiantes para la transformación de la Universidad.
Responsabilidad Social Universitaria	13	ETSIMFMN	Iniciativa focalizada en aspectos ambientales y de participación del alumnado en propuestas de mejora en la Escuela
Huella de Carbono	14	ETSIMFMN	Pretende la medición y gestión de la huella de carbono en la Universidad utilizando para ello metodologías diseñadas a tal fin y que ya han sido validadas.
Mapeo de riesgos	15	ETSII	Evaluación de riesgos.

Para poder coordinar dichas iniciativas y hacer que afloren las sinergias entre las mismas, se llevó a cabo un proceso de análisis basado en la metodología propuesta por *European Institute of Innovation and Technology* (EIT) [16]. De esta manera se generaron 3 ejes en torno a los que alinear cada iniciativa:

- **Eje ambiental:** grupo compuesto por aquellas propuestas asociadas a la medición de distintas variables físicas, siendo el fin tanto la monitorización de distintas ubicaciones como la definición de protocolos o posibles "productos" en base a las mediciones. Asimismo, dichas acciones tendrán como objetivo la comunicación de los resultados y la creación de una carta de servicios. Como punto de partida se elaborará un mapa de los recursos existentes en esta dirección y de equipamientos I+D del Campus para una mejor organización (ver Mapa de I+D en Tabla 1).
- **Eje social:** grupo coordinado, compuesto por propuestas como *Out of Silence*, *Second Hand* o *Global Challenge*, las cuales tienen como objetivo la concienciación de los distintos colectivos mediante la movilización y la comunicación.
- **Eje mixto:** cuya visión va enfocada a realizar una movilización y comunicación desde lo social para promover una mejora en lo ambiental y la generación de una carta de servicios.

Por otro lado, las iniciativas se clasificaron y se asignaron a uno de tres ámbitos específicos o a uno – el de coordinación- más generalista:

- **Coordinación** de las iniciativas para la correcta ejecución del proyecto.
- **Sensorización**. Iniciativas que cuentan con sensores, cuyos datos pueden publicarse a través de una base de datos de indicadores técnicos útil para la toma de decisiones.
- **Eficiencia Energética y Naturación**. Iniciativas vinculadas con el uso más eficiente de la energía en la Universidad así como con la aplicabilidad de los recursos naturales que la misma dispone o puede disponer en sus instalaciones, tales como un arboreto o jardines verticales.
- **Movilización**. Iniciativas que, principalmente, promueven el cambio de actitudes en la comunidad universitaria

La Tabla 2 muestra cómo se clasifican las diferentes iniciativas que engloba el proyecto RES2+U en base a los ejes y ámbitos mencionados anteriormente.

Tabla 2. Mapeo de iniciativas a ejes vertebradores y ámbitos de aplicación

Ejes/Ámbitos	Coordinación	Sensorización	Eficiencia Energética y Naturación	Movilización
Ambiental		1, 4, 5, 8, 9, 10	14	
Social				2, 3, 6, 11, 12
Mixto	13, 15		7, 9	

La complejidad del proyecto permite identificar una gran cantidad de resultados alcanzables al finalizar el mismo. Cabe destacar que, si bien la convocatoria de ayudas que ha provocado la creación de la plataforma RES2+U presenta un plazo de ejecución de un año (31 de marzo de 2019), la intención del grupo es continuar con el germen que se ha sembrado gracias a dicha convocatoria. La identificación de entregables permite, en primer lugar, plantear resultados tangibles que puedan ser replicados en otras escuelas, universidades, organizaciones, y, por tanto, colaboren a alcanzar la trascendencia de la Plataforma RES2+U. A continuación, se listan algunos de los resultados esperados:

- Página de comunicación del proyecto, en la que no sólo se incluyan los avances de RES2+U sino también de todas las iniciativas que se puedan englobar en la misma.
- Libro Blanco de la sostenibilidad multicriterio.
- Publicación de códigos de buenas prácticas relacionado con la sostenibilidad en un sentido amplio.
- Mapa I+D de recursos. Como parte del proyecto, se pretende actualizar la plataforma *Sharingmatter* [17] con todos los recursos de I+D involucrados en el mismo (p.ej., sensores). Esta plataforma pretende dar visibilidad a los recursos de I+D para favorecer el uso eficiente de los mismos.
- Mapa de sostenibilidad.
- Mapa de cubiertas “sostenibles” en edificios de la UPM, que identifique aquellas cubiertas con potencial solar-fotovoltaico [18], [19]. El objeto de este trabajo es estudiar las posibles estrategias a seguir para conseguir una mayor eficiencia energética de los distintos edificios de la UPM en el Campus de Ciudad Universitaria. El área de Ciudad Universitaria está regulada por un Plan Especial en el que se establecen varios grados de protección para los distintos edificios. Esta situación limita las actuaciones a realizar, especialmente la intervención en la envolvente, la cual permitiría mejoras pasivas (p.ej., aumento de aislamiento, cambio de carpinterías, etc.) y reduciría la demanda energética de los edificios. Sin embargo, se permite la intervención en cubiertas siempre que no sea visible desde la calle. La mayoría de las cubiertas son planas y están libres de elementos, lo cual facilita la instalación de paneles fotovoltaicos que pueden producir energía eléctrica aprovechable en el edificio o sus colindantes. Por otra parte, la demanda energética coincide temporalmente con el período de generación de los paneles. Así pues, se elaborará un mapa solar de la zona con el objetivo de calcular la radiación global y, tras la elaboración de

dicho mapa, se estudiarán las cubiertas de los edificios y distintas opciones de instalación con el fin de obtener la solución óptima.

- *Marketplace* de segunda mano para alumnos a nivel UPM [20].
- Prototipo de portal *Open Data* que permita acceder a los datos de los sensores de las iniciativas participantes en el proyecto en un formato uniforme y automáticamente procesable, facilitando por tanto el que se puedan llevar a cabo estudios (p.ej., trabajos fin de titulación, tesis doctorales) sobre ellos, con el objetivo de dar lugar en última instancia a un ecosistema de innovación abierta dentro del Campus. La metodología que se seguirá en este desarrollo es la siguiente. En primer lugar se analizarán los datos almacenados por las iniciativas enmarcadas dentro del ámbito de sensorización (4, 5, 8, 9 y 10). A continuación, se definirá un modelo de datos en base al análisis previo y a la *Semantic Sensor Network Ontology* de la W3C (*World Wide Web Consortium*) [21]. Una vez hecho esto, se desarrollarán *parsers* para traducir los datos de las distintas plataformas al modelo de datos definido y almacenarlos en una base de datos común (en principio, se optará por una opción NoSQL, concretamente MongoDB). Por último, se desarrollará un *swagger web* que permita acceder a esos datos en diferentes formatos estándar.
- Prototipos derivados de la experimentación y sensorización, incluyendo propuestas de aplicaciones conjuntas. En este caso la idea es intentar integrar las diferentes iniciativas de sensorización mediante la propuesta de aplicaciones conjuntas y la identificación del equipamiento que haría falta para su puesta en funcionamiento.
- Procedimientos para el cálculo, gestión y registro de la Huella de Carbono.

4 Conclusiones y trabajos futuros

Este artículo presenta el proyecto RES2+U, financiado con fondos propios de la UPM dentro del programa “XVIII Convocatoria para Acciones para contribuir al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)”. Las observaciones que se desarrollan en este proyecto están en consonancia con la estrategia nacional en *Smart Cities* [22], encontrándose España en la vanguardia mundial en este ámbito, como confirma la invitación realizada a nuestro país dentro del Foro Mundial sobre Ciudades Inteligentes (ITU-ISO-IEC) celebrado en 2016 en Singapur. Este proyecto representa un buen ejemplo de la importancia de un enfoque multidisciplinar a la hora de afrontar problemas tan complejos como la eficiencia y sostenibilidad en entornos urbanos, integrando más de una decena de iniciativas enmarcadas dentro de este ámbito lideradas por profesores y alumnos de distintas Escuelas de la UPM.

Asimismo, el proyecto también ilustra el potencial de la Universidad, en general, y de la UPM y el Campus de Moncloa, en particular, como punto de encuentro y plataforma de prueba y experimentación donde la comunidad universitaria, junto a entidades relacionadas como ayuntamientos o empresas, pueden participar en la evaluación de servicios e iniciativas novedosas antes de su despliegue y puesta en marcha a gran escala.

Si bien la complejidad de gestionar proyectos de estas características no es para nada despreciable, presentan muchas ventajas, como la versatilidad y flexibilidad que aporta el reunir a personas con conocimientos sobre áreas distintas, a veces complementarias, así como su efecto dinamizador y catalizador de cara a futuras iniciativas.

Como prueba de ello cabe destacar las sinergias que ya se han establecido entre el proyecto RES2+U y la colaboración con el Ayuntamiento de Madrid sobre el Plan A de Calidad del Aire y Cambio Climático liderada por el Centro de Innovación en Tecnología para el Desarrollo Humano (ITD) de la UPM. Dicha colaboración, que también persigue sacar partido al Campus de Moncloa como *living lab*, ha sido estructura en 3 grupos de trabajo ((1) Red Climática, (2) Movilidad urbana, y (3) Naturación del Centro de Creación Contemporánea "Matadero"), colaborando en todos ellos participantes del proyecto RES2+U.

Además, también se espera que el proyecto RES2+U y la colaboración con el Ayuntamiento de Madrid incentive la participación en proyectos enmarcados dentro del programa del EIT Climate KIC [23], en el que la UPM participa.

De cara a futuro, es importante seguir involucrando a más actores interesados, incluyendo nuevo conocimiento (p.ej., Universidad Complutense) y puntos de vista, con el objetivo de crear una masa crítica que permita acometer proyectos más ambiciosos con un mayor impacto en la ciudad y en la sociedad.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por la Universidad Politécnica de Madrid (UPM) a través del programa "XVIII Convocatoria para Acciones para contribuir al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)" y por el Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED) a través de la red CITIES (518RT0557). Los autores quieren expresar su agradecimiento al resto de participantes en el proyecto RES2+U.

Bibliografía

1. ONU: Perspectivas Mundiales de Urbanización. 2018. *On-line*: https://www.un.org/development/desa/publications/2018-revision-of-world-urbanization-prospects.html, último acceso 13/07/2018
2. Pallot M.: Engaging Users into Research and Innovation: The Living Lab Approach as a User Centred Open Innovation Ecosystem. Webergence Blog (2009). *On-line*: https://web.archive.org/web/20120509081658/http://www.cwe-projects.eu/pub/bscw.cgi/1760838?id=715404_1760838, último acceso 13/07/2018
3. Almirall, E., Wareham, J.: Living Labs: Arbiters of Mid- and Ground- Level Innovation. Technology Analysis and Strategic Management 23(1), 87-102 (2011).
4. Campus de Excelencia Internacional (CEI) de Moncloa, http://www.campusmoncloa.es/en/
5. UPM Máster en *City Sciences*, http://www.citysciences.com/en/index.html, último acceso 13/07/2018
6. UPM *City of the Future*, http://blogs.upm.es/cityofthefuture-upm/en/initiative/, último acceso 13/07/2018

7. *TUDelft Green office*, https://www.tudelft.nl/sustainability/, último acceso 13/07/2018
8. *UBC Campus as a living laboratory*, https://sustain.ubc.ca/our-commitment/campus-living-lab, último acceso 13/07/2018
9. *Harvard Sustainability*, https://green.harvard.edu, último acceso 13/07/2018
10. *MIT Center for Collective Intelligence*, https://cci.mit.edu/, último acceso 13/07/2018
11. Malone, T.W.: Superminds: The Surprising Power of People and Computers Thinking Together, 1st edition, Hachette Book Group, Inc (2018)
12. Declaración de Salamanca, https://www.conferenciaods.com/declaracion/, último acceso 01/09/2018
13. Cómo empezar con los ODS en las Universidades, http://reds-sdsn.es/wp-content/uploads/2017/02/Guia-ODS-Universidades-1800301-WEB.pdf, último acceso 01/09/2018
14. UNESCO ODS, https://es.unesco.org/sdgs, último acceso 13/07/2018
15. Alvarez-Campana, M., *et al*., Smart CEI Moncloa: An IoT-based Platform for People Flow and Environmental Monitoring on a Smart University Campus, *Sensors*, 17(12), (2017). *Online*: http://www.mdpi.com/1424-8220/17/12/2856 , último acceso 13/07/2018
16. *EIT learning concept*, https://eit.europa.eu/eit-learning-concept, último acceso 13/07/2018
17. Sharingmatter, http://sharingmatter.com/, último acceso 01/09/2018
18. IES 2018. Energía limpia y gestionable para tod@s. Libro de Actas del XVI Congreso Ibérico y XII Congreso Iberoamericano de Energía Solar. 20 – 22 de junio de 2018 Madrid, España
19. Desthieux G., *et al.*, Solar energy Potential Assessment on Rooftops and Facades in Large Built environments Based on LidAR data, Image Processing, and Cloud Computing. Methodological Background, Application, and Validation in Geneva (solar Cadaster), *Frontiers in Built Environment*, 2018
20. Marketplace de segunda mano de la UPM, http://appforsharing.com/alumnos-UPM/index.php, último acceso 01/09/2018
21. W3C Semantic Sensor Network Ontology, https://www.w3.org/TR/vocab-ssn/, último acceso 01/09/2018
22. UNE 2018. Documento técnico de Trabajo de APOYO DE LA NORMALIZACIÓN A LAS POLÍTICAS PÚBLICAS EN EL ÁMBITO DE LA ARQUITECTURA Y LA EDIFICACIÓN.
23. *EIT Climate KIC*, http://www.climate-kic.org/, último acceso 13/07/2018

Integrating non-conventional renewable energy sources (NCRES) in the energy mix in Colombia – Challenges and opportunities

Alejandro Paz Parra[1]

[1] Pontifical Xaverian University CALI, Colombia
apaz@javerianacali.edu.co

Abstract. The integration of NCRES in the energy matrix of any country is a challenging element for the entire energy industry and the different levels of society. In Colombia the integration has just beginning thus there are many challenges and opportunities associated to the energy transition. In present paper these challenges and opportunities are analyzed and presented with a description of the Colombian case in the Latin American and world context. The challenges are summarized and classified in three main axes: Legal and normative, educational and technical, Colombia's strengths in this matter are also presented as well as the projects that are underway for the diversification of the energy matrix.

Keywords: Colombia, Renewable energy, NCRES, Electric energy, Colombian energy mix.

1 Introduction

Distributed generation systems based on NCRES have experienced significant growth during the last decade, in response to the increasing costs of electric power generated with non-renewable energy sources as well as the desire to reduce the environmental impact of conventional generation systems. Currently, up than 75% of the world electricity generation is based in non-renewable energy sources like coal, natural gas or oil as shown in Table 1 [1].

The introduction of the NCRES in the electricity generation, however, generates doubts about the way in which the generation, transmission, distribution and final use of electric power is planned and executed, because the existing distribution electric grids are planned for the flow of electricity in a unidirectional way that goes from large power plants to the distributor and from this one to the end user, and not vice versa.

To introduce changes in the economic dispatch, the control techniques applied to the electric power flow, variations in the power systems stability and the protective relays coordination are ones of the main challenges that modern technologies in electricity generation and control requires.

Table 1. World electricity generation from renewable sources in 2016.

Energy source	Electricity generation (TWh)	%
Hydropower	4241	16,6%
Wind-power	1022	4,0%
Biomass	511	2,0%
Solar PV	383	1,5%
Geothermal & Ocean	102	0,4%
Total renewables	6260	24,5%
Non-renewable	19292	75,5%
Total generation	25551	100%

Colombia is a country that is beginning the road towards the introduction of NCRES in its energy mix; although its energy mix is composed in a 70% by hydraulic generation this is made in a traditional form, in large hydroelectric plants with a centralized economic dispatch completed by large thermal power plants based on coal, diesel or natural gas that generates the rest of the electric power demand, there is a political and regulatory framework that tends to increase the representability of the NCRES in the energy mix to reduce the coal fingerprint to reach the international compromises acquired in the Paris agreement.

This requires a multidisciplinary approaches to different aspects of the integration of NCRES in the Colombian energy mix to define the real possibilities of the substitution of the generation component based in non-renewable resources and to define the basic elements that facilitate the energy transition in the three axis of the sustainable development scenario.

2 Integrating NCRES in the energy mix - Colombia in the world scenario

2.1 Renewables all around the world

The world primary energy consumption grew 1.8% in 2017 with respect 2016 to reach the 13511, 2MTOE (157135 TWh) as reported the BP statistical review of world energy 2017 [1]. The average grew rate reach the 1.7% annually and the energy consumption growth were of 16, 7% in just one decade as shown in Fig 1.

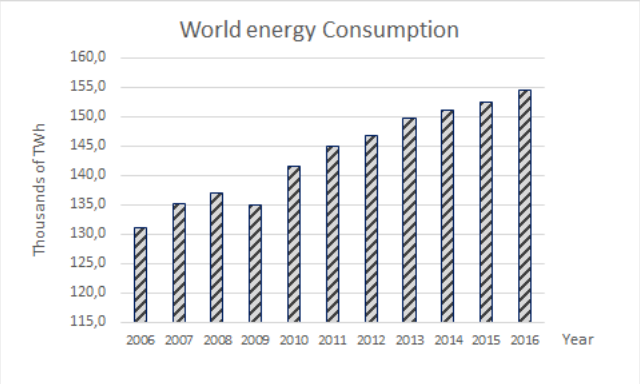


Fig. 1. Global primary energy consumption from 2006 to 2016 [1].

The 2017 energy mix is shown in Fig 2, it is shown than near 90% of the primary world energy consumption came from non-renewable resources.

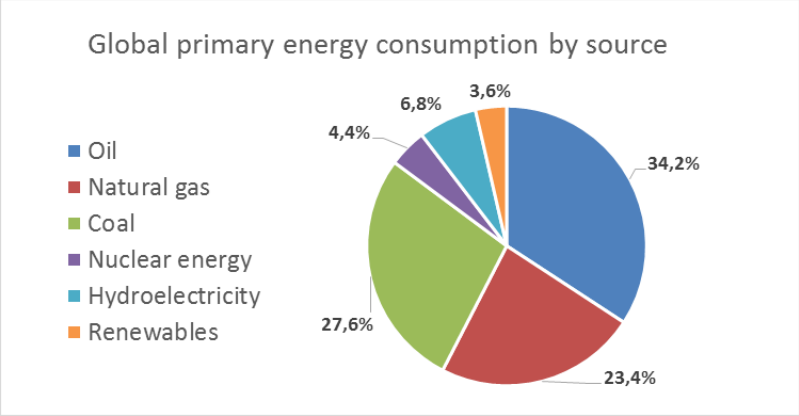


Fig. 2. Global primary energy consumption by source in 2017 [1].

The composition of the energy mix by primary sources has led to a very high concern due to greenhouse gas emissions produced by the transformation of energy into electricity from these sources, which is necessary to maintain economic growth and productivity. In Table 1 is shown the electricity generation by regions all around the world. The most representative regions in electricity generation and consumption are North America (USA 4281, 8 TWh). Europe& Eurasia and the Asia Pacific (China 6495, 1Twh).

In the world energy consumption only 16% of the primary energy was converted into electricity (25551, 3TWh/157.135TWh) and just the 24, 5% of the electricity came from renewable resources.

Table 2. World electricity generation by regions 2017 [1].

Region	Electricity generation (TWh)	%
North America	5290,2	20,7%
South & Central America	1315,8	5,1%
Europe & Eurasia	5440,8	21,3%
Middle East	1210,9	4,7%
Africa	830,7	3,3%
Asia Pacific	11462,9	44,9%
Total generation	25551,3	100%

The participation of renewable resources in the electricity generation is shown in Fig 3.

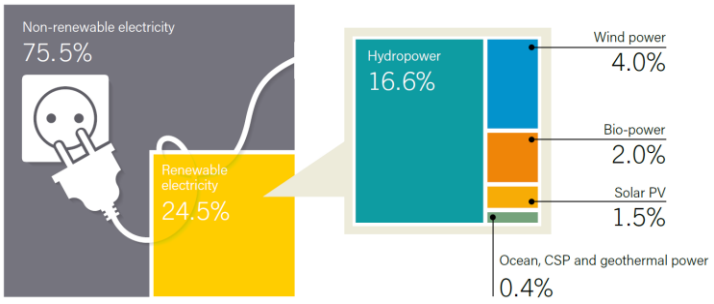


Fig. 3. Global electricity generation by source in 2016. Image taken from [3].

After the signing of the Kyoto Protocol in 1998 and the Paris agreement in 2005 there has been a growing concern to increase the participation of renewable energies within the global energy mix [4-5]. Renewable power generation technologies are quickly becoming cheaper than conventional technologies at a much faster pace than expected just a few years ago. Over the last two years the costs of offshore wind have shown a steep decline with recent auctions in The Netherlands, Denmark and the UK awarded at record low prices of around 6 Eurocents per kilowatt-hour (kWh). In the case of solar PV, module prices in Europe have declined by about 80% from 2010. A utility-scale solar PV auction in Germany in June 2017 yielded an average cost of 5.6 Eurocents per kWh. In the scenario the International Renewable Energy Agency (IRENA) estimates that, renewables could account for 41% of total generation in 2030, with variable renewable energy (mainly solar PV and wind) accounting for 21% of total generation [6].

A combination of low prices and policies that favor the implementation of NCRES adopted by up than 164 countries around the world had conducted to the increase of the installed capacity in wind energy and photovoltaic electricity in the last decade as shown in Fig 4 and Fig 5 [3].

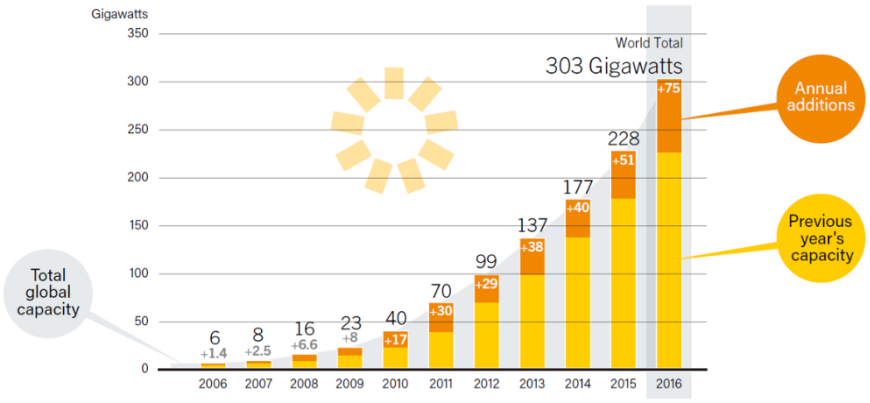


Fig. 4. Solar PV global capacity and additions from 2006 to 2016. Image taken from [3].

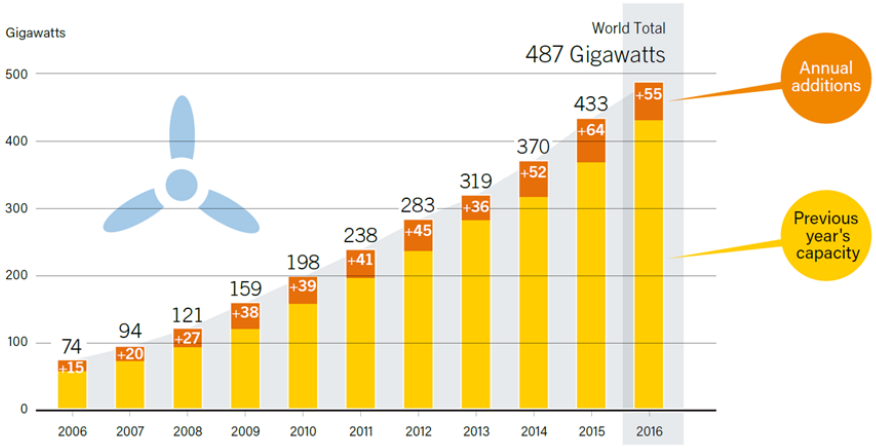


Fig. 5. Wind energy global capacity and additions from 2006 to 2016. Image taken from [3].

2.2 Renewables in Latin America

The primary energy consumption in Latin America grew 1% in 2016 with respect 2015 to reach the 891 MTOE (10.370, 8TWh) as reported the BP statistical review of world energy 2017 [1]. The average grew rate reach the 2% annually and the energy consumption growth were of 20, 0% (faster than the world media) in just one decade as shown in Fig 6.

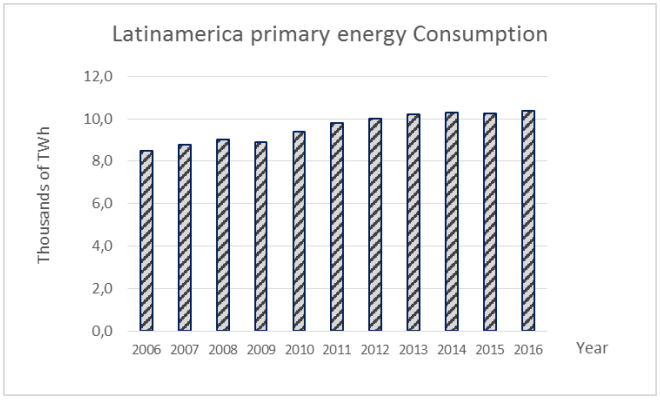


Fig. 6. Latin America primary energy consumption from 2006 to 2016 [1].

The 2017 energy mix in Latin America is shown in Fig 7, it is shown than in Latin America up than 23% of primary energy came from renewable resources (more than twice off the world average).

In terms of energy capacity from NCRES, there is an important growing in the las decade boosted by the Wind energy growing as seen in Fig 8. There´s and important representation of Bio-energy caused by the agricultural vocation of the region and the use of large areas of land for the cultivation of plants to generate bio-fuels (Ethanol, Bio-diesel and others.)

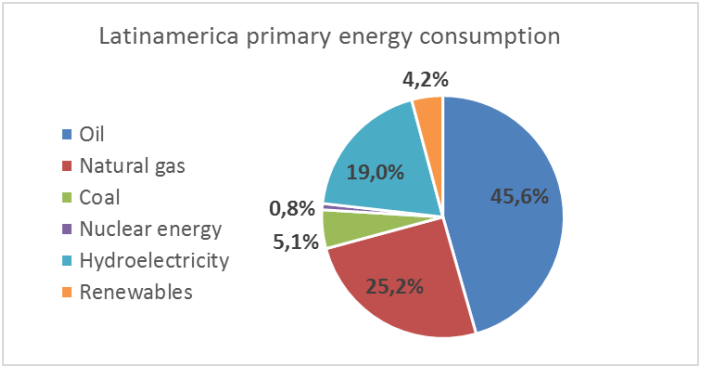


Fig. 7. Latin America primary energy consumption by source in 2017 [1].

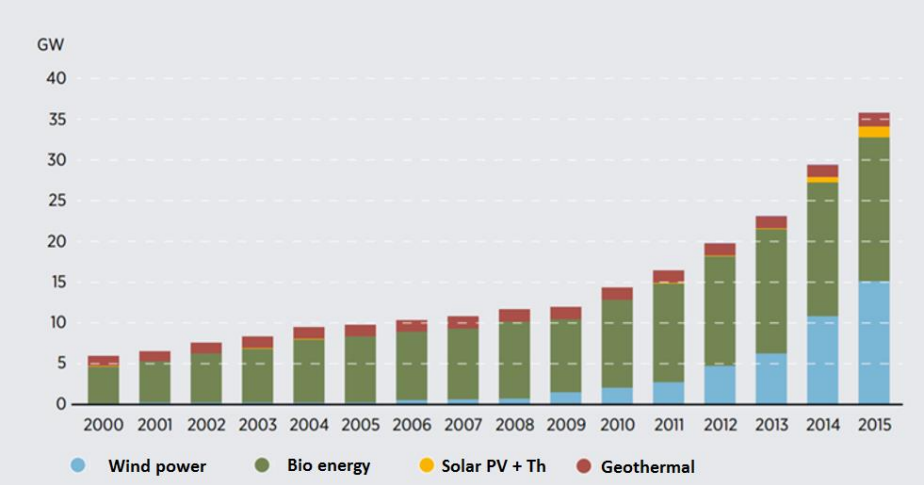


Fig. 8. Latin America renewables capacity evolution 2000 to 2015. Image taken from [7].

Latin America is the world leader in the production of bio-fuels as seen in Fig 9.

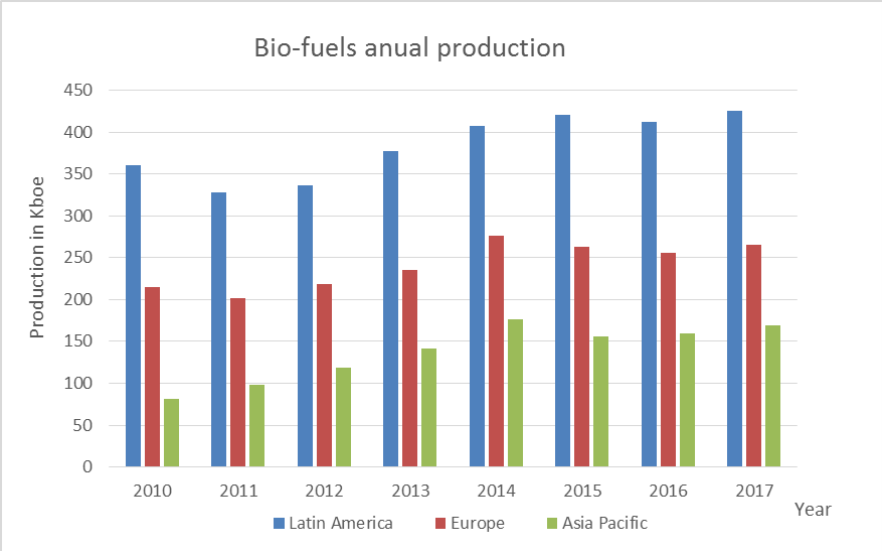


Fig. 9. Latin America bio-fuels production from 2010 to 2017 [1].

The electricity generation in most of the Latin-American countries is made from renewable sources as shown in Fig 9. Most of the Latin American countries generate up than 50% of its electricity (Colombia 74.5%) based on renewable sources (Main hydroelectricity) with the exception of Argentina (31.5%), Bolivia (28.0%), Mexico (17.5%), Chile (41.2%) and Honduras (43.8%) [9].

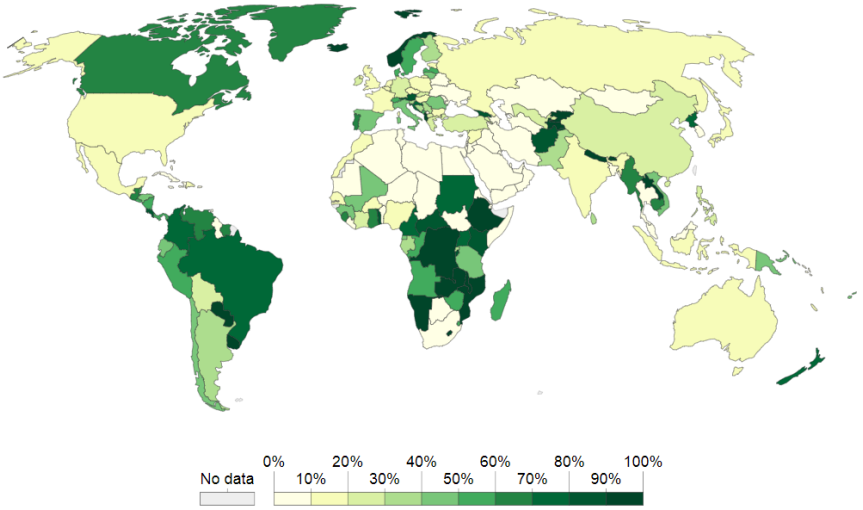


Fig. 10. Share of electricity generation based on renewable sources in 2014. Image taken from [9].

2.3 Colombia in the Latin American context

The global energy consumption in Colombia in 2017 reach the 42.6 MTOE (495.9 TWh) with a growth of 33% in the las decade. The 31.3% of this energy came from renewable resources (Three times the world average 10.4%). The mix of the Colombian energy consumption is shown at Fig 10.

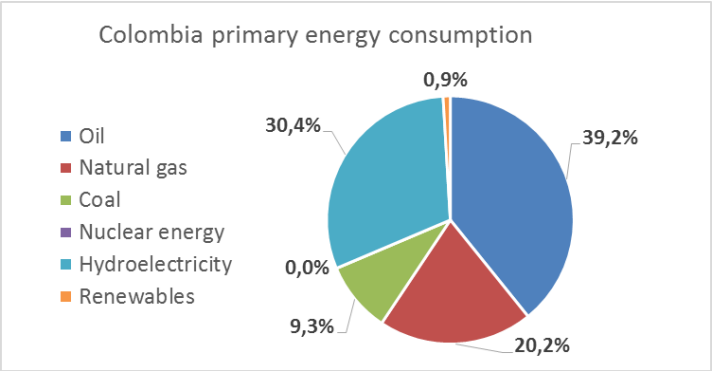


Fig. 11. Colombia primary energy consumption by source in 2017 [1].

In terms of its electricity generation Colombia generated 75.3TWh in 2017 (16.4% of its total energy consumption). The 74.3% of its electricity came from renewable sources (mainly hydroelectricity). The mix of electricity capacity in Colombia (Total 16.5GW) is shown in Fig 12.

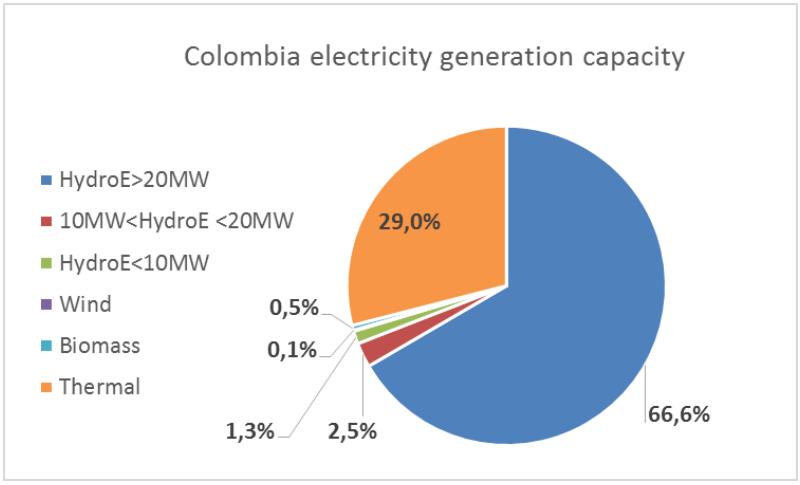


Fig. 12. Mix of Colombia electricity generation capacity by source in 2017 [1].

Colombia is a country of large hydroelectric power plants and can be defined as a "green country" because its activities produce only the 0.46% of the global CO_2 emissions, nevertheless it signed the Paris agreement and tempt to reduce its CO_2 emissions in 20% in 2030 with respect the baseline of 2016. In terms of NCRES the current capacity to generate electric energy in Colombia is negligible as shown in Fig 13, if compared with Honduras, Uruguay or Nicaragua.

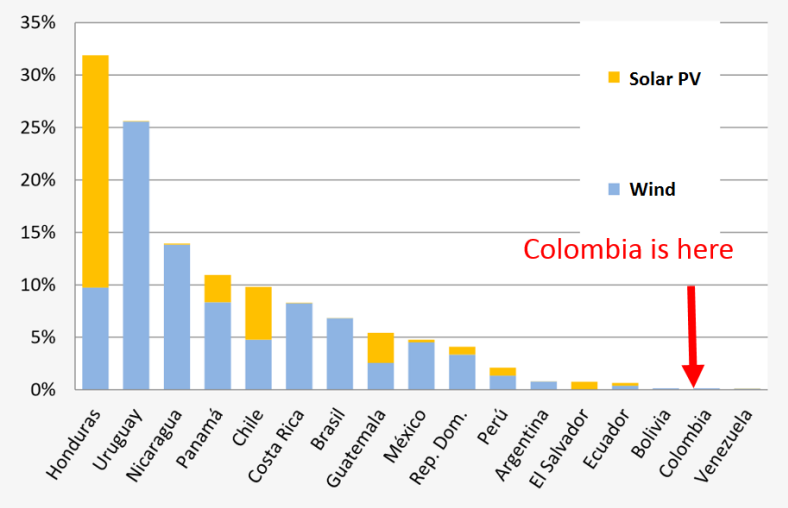


Fig. 13. Portion of the capacity for electricity generation covered by NCRES in 2016. Image taken from [8].

To reach the goal of CO_2 reduction there is a set of energy policies formulated by the Colombian government that tend to favor the diversification of the energy mix with NCRES and the culture of energy efficiency in households and industrial production. A study conducted by the Energy mining planning unit (UPME) revealed than the potential of electricity generation from wind energy can triplicate the current total capacity. In wind energy the potential to generate electric energy is of 29.5GW and the mean of the solar radiation is 4.5kW/m^2/day [10].

3 Challenges and opportunities to integrate NCRES in Colombian energy mix

To diversify the Colombian energy matrix there are mainly three axes of action: The technical, educational and economic axis. Below are the main challenges and opportunities present in each axis.

3.1 Attraction of investment to take advantage of existing potential. Economical axes.

Although in Colombia there is a legal and regulatory framework that favors the integration of NCRES in the energy mix, through taxes and economic incentives for the importation of solar PV and wind power generation equipment, these stimuli have not been sufficient to boost the massive installation of these generation systems throughout the country.

Recently, the 1715 law from 2014 has established new play rules for the investments in large power plants based in NCRES that has been effectives to stimulate the investments in solar PV and wind energy projects mainly located in the north of the country near the Caribbean Sea as shown in Fig 14. It´s expected a growing in the capacity of electricity generation of 4.5% equivalent to 740.8MW from NCRES (Wind 380MW & Solar PV 360.8MW) and a total generation of 2743GWh/year (3.6% of annual electricity consumption).

Other legal advances are the promulgation of the resolution 030-2018 and the resolution 038-2018 (March 2018) of the Regulatory Commission for Gas and Energy (CREG) designed to promote distributed generation based on NCRES for energy service users with capacity lower than 1MW and until the 15% of the network capacity (Technical limit). These two resolutions introduce the system of energy credits to reimburse the payments for surplus generation that are injected into the network by the so-called self-generators, is to say, energy users that install small generation systems (<1MW) and with capacity to sell surplus generation to the electric distribution network.

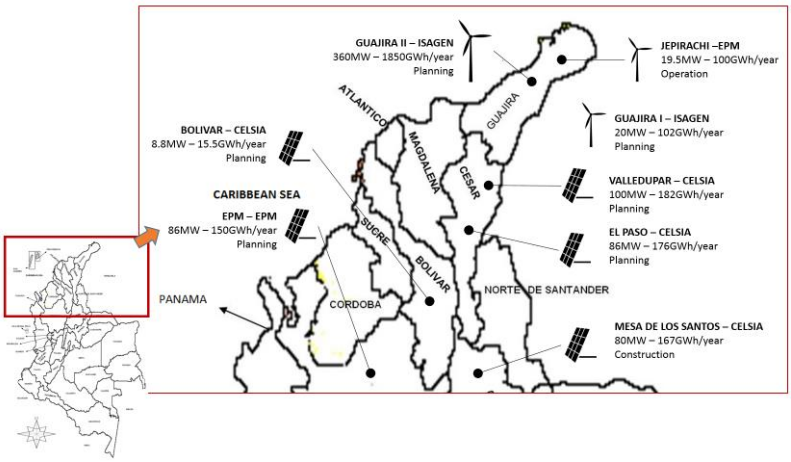


Fig. 14. Electric energy generation based on NCRES projects in Colombia - 2018.

The resolution 030-2018 is applied to users connected to the national interconnected system (SNI) and the 038-2018 apply to those users out of the SNI in the non-interconnected zones (ZNI).

3.2 Technical limits for NCRES integration.

The electric grid in Colombia is designed to transport energy from large hydroelectric plants to the distribution networks and from these to the end user, and not vice versa; thus the introduction of the NCRES in the electricity generation, generates doubts about the way in which the generation, transmission, distribution and final use of electric power is planned and executed.

Changes in the energy generation patterns caused by the intermittence NCRES and its effects in the power grid obligates to introduce changes in the economic dispatch, the control techniques applied to the electric power flow and the protective relays coordination to sustain the stability of the power grid and adequate quality indicators to the end user [11-14].

3.3 Educational changes in the curriculum of electric engineering bachelor programs.

In Colombia the curriculum in electric engineering programs is adapted to the form and the topology of the energy generation and distribution in the classic form, from the large power plants to the end user. Thus, changes in the paradigm obligate to introduce courses based in the teaching of new distributed generation forms to operate the power

grid. The technical and administration of the energetic resources under this new paradigm must be considered by all professionals linked to the electric generation and distribution electric chain, from the technical level to the policy makers.

Short-term mid-career training of scientists, engineers, policy-makers, and administrators in aspects related with NCRES is required. It must be emphasized that for effective and large-scale dissemination of NCRES initiating and strengthening efforts at all the above levels is equally important [15-16].

4 Conclusions

Colombia is a country with a geographical privileged location for energy generation based on NCRES but its exploration is just incipient. The composition of the mix of capacity for electric energy generation is up than 70% renewable but strongly dependent of the climate changes because is based in hydroelectricity. To increase and sustain the growing of the component of NCRES in the electric mix generation constitute a challenge and an opportunity.

The high potential to generate electric energy based in NCRES combined with the increasing of electric energy demand constitute an attractive opportunity to national or international investors in energy generation.

The education of present and future engineers, technical personal, administrators and policy makers constitute a challenge for universities and technical centers or education to reach the adequate integration of NCRES in the energy generation and distribution system in Colombia.

References

1. British Petroleum, «BP Statistical Review of World Energy 2017, » 14 06 2017. Retrieved from: “https://www.bp.com/content/dam/bp/en/corporate/pdf/energy-economics/statistical-review-2017/bp-statistical-review-of-world-energy-2017-full-report.pdf”[Online Resource]
2. Organización de las Naciones unidas ONU, Protocolo de Kyoto de la convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático, Kyoto - Japón: Naciones Unidas, 1998.
3. REN21 - Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, Renewables 2017 [2] - Global status Report, Madrid - Spain: REN21, 2017.
4. United Nations Organization UN, “Kyoto protocol of the convention framework of the united nations on climate change”. Kyoto – Japan, 1998.
5. United Nations Organization UN, “Paris Agreement”. Paris – France, 2005.
6. International Renewable Energy Agency - IRENA. International Renewable Energy Agency. Renewable Energy Prospects for the European Union Based on REMAP analysis. February 2018.
7. International Renewable Energy Agency - IRENA, «Análisis del mercado de energías renovables - América Latina,» IRENA, Abu Dabi - Emiratos Árabes Unidos EAU, 2016.

8. International Renewable Energy Agency - IRENA, «Integrando energías renovables en sistemas de potencia en Centroamérica,» IRENA, Ciudad de Panamá - Panamá, 2016.
9. H. Ritchie and M. Roser - "Energy Production & Changing Energy Sources". Published online at OurWorldInData.org. (2018). Retrieved from: ‘ https://ourworldindata.org/energy-production-and-changing-energy-sources ' [Online Resource]
10. Energy mining planning unit UPME. “Estudio para la integración de renovables en Colombia” - 2015
11. X. Liang, "Emerging Power Quality Challenges Due to Integration of Renewable Energy Sources," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 53, no. 2, pp. 855-866, March-April 2017.
12. Maryam Hashemi N. and V. Agelidis, "Evaluation of voltage regulation mitigation methods due to high penetration of PV generation in residential areas," 2013 International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), Madrid, 2013, pp. 1180-1189.
13. H. Hatta, M. Asari and H. Kobayashi, "Study of energy management for decreasing reverse power flow from photovoltaic power systems," 2009 IEEE PES/IAS Conference on Sustainable Alternative Energy (SAE), Valencia, 2009, pp. 1-5.
14. F. Dragomir and O. E. Dragomir, "Distributed Power Generation from Renewable Energy Resources: A Framework for Load Forecasting in Low Voltage Power Grids," 2012 Sixth UKSim/AMSS European Symposium on Computer Modeling and Simulation, Valetta, 2012, pp. 299-304.
15. Caglayan Acikgoz, “Renewable energy education in Turkey”, Renewable Energy, Volume 36, Issue 2, 2011, Pages 608-611.
16. Tara C. Kandpal, Lars Broman, “Renewable energy education: A global status review”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 34, 2014, Pages 300-324.

This book collects the results of the I Ibero-American Congress of Smart Cities (ICSC-CITIES 2018). The congress has been possible thanks to CYTED. CYTED is the Ibero-American Program of Science and Technology for Development, created by the Ibero-American governments to promote cooperation in science, technology and innovation for the development of Ibero-America.

CYTED achieves its objectives through different funding instruments that mobilize entrepreneurs, researchers and Ibero-American experts to allow them to train and generate joint research, development and innovation projects. Thus, the countries that make up the CYTED Program manage to keep up-to-date with the latest advances in science and technology. The University of Valladolid (Spain) coordinates the Thematic Network called CITIES.

This book is based on the subject areas that have been defined by the Congress' Committee of Experts: Energetic Efficiency and Sustainability; Infrastructures, Energy and the Environment; Mobility and IoT; and Governance and Citizenship.

CITIES
CIUDADES INTELIGENTES TOTALMENTE INTEGRALES, EFICIENTES Y SOSTENIBLES

PROGRAMA IBEROAMERICANO
CYTED
CIENCIA Y TECNOLOGÍA PARA EL DESARROLLO

UVa

VIGILADA MINEDUCACIÓN
USC
UNIVERSIDAD SANTIAGO DE CALI
EDITORIAL