

Comunicaciones Científicas



Greencities

10° Foro de Inteligencia y Sostenibilidad Urbana

#igcMalaga

www.igcmalaga.com

Edita:

Palacio de Ferias y Congresos de Málaga - FYCMA

Dirección:

M^a Luisa Gómez Jiménez

Coordinación:

Olga Romero Guisado

ISBN: 978-84-09-01166-7

INTERNATIONAL GREENCITIES CONGRESS

Actas del IX International Greencities Congress
Málaga, 25-26 de abril de 2018

Autores

Enrique Alba	Javier Lerga
Andrés F. Alcántara Valero	Javier Llorente
Manuel Álvarez	Pau Lloret-Gallego
Inés Aragüez Del Corral	Miguel Magaña Suárez
Adolfo Ballesteros De Juan	María José Márquez-Ballesteros
Jorge F. Blanquer Jaraíz	María Martín
Tatiana Cardador Jiménez	María Luisa Martínez
Manuel Carpio	Luis Medina Montoya
Martín Cobos Rodríguez	Álvaro Miranda
Carmen Cordovilla González	Llanos Mora-López
Berta Cormenzana	Rami D. Orejón-Sanchez
María Teresa De Diego	Alejandro Peña Paredes
Carmen Díaz	José Miguel Peña Suárez
Sergio Díaz De Garayo	Miguel Picornell
Francisco Fernández Hernández	Santiago Rincón Arévalo
Javier Ferrer	Natalia Rojas González
Iris Galloso	Antonio Ruiz Celma
Antonio García	Á. Enrique Salvo Tierra
Moisés Garrido Martín	Mariano Sidrach-De-Cardona
María Del Carmen González Muriano	Andreas Sumper
Alfonso Gago-Calderón	Jamal Toutouh
Ricardo Herranz	Victoria Vázquez Godoy
Dionisio Izquierdo Bravo	Montserrat Zamorano
Gabriel Jarillo Rodríguez	

ÍNDICE

Comité científico.....	06
Lista de Autores	06

PRIMERA SESIÓN

BLOQUE I - ACTUACIONES SOSTENIBLES DEL ESPACIO URBANO

Comunicaciones

PROYECTO MIRE 3D: MODELIZACIÓN DE INFORMACIÓN URBANA DE ENERGÍA EN 3D	09
--	-----------

María Teresa De Diego

Antonio García

PROYECTO SIMUE - SISTEMA DE MODELIZACIÓN DEL URBANISMO ECOSISTÉMICO... ..	20
--	-----------

María Luisa Martínez

Berta Cormezana

ESTUDIO DE SBN APLICABLES A UN PROYECTO DE ZONA VERDE: MODELO DE ISLAS DE BIODIVERSIDAD ALBORÁNICA PARA EL PARQUE COMANDANTE BENÍTEZ (MÁLAGA)	39
--	-----------

Á. Enrique Salvo Tierra

Natalia Rojas González

Andrés F. Alcántara Valero

Tatiana Cardador Jiménez

Luis Medina Montoya

BLOQUE II - ACTUACIONES SOSTENIBLES EN LA EDIFICACIÓN

Comunicaciones

ALGORITMO DE CONTROL DE ELEMENTOS DE SOMBRAS Y CLIMATIZACIÓN ZONIFICADA EN EL SECTOR RESIDENCIAL	58
---	-----------

Francisco Fernández Hernández

José Miguel Peña Suárez

María del Carmen González Muriano

MEDICIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD ENERGÉTICA EN EL ÁMBITO URBANO	66
---	-----------

MARIANO SIDRACH-DE-CARDONA

LLANOS MORA-LÓPEZ

MARÍA JOSÉ MÁRQUEZ-BALLESTEROS
ANDREAS SUMPER
PAU LLORET-GALLEGO

SISTEMA DE GESTIÓN AMBIENTAL DE METRO DE MADRID 82

CARMEN CORDOVILLA GONZÁLEZ
GABRIEL JARILLO RODRÍGUEZ
JORGE F. BLANQUER JARAÍZ

CATÁLOGO DE METODOLOGÍAS PARA LA EVALUACIÓN DE EDIFICACIÓN SOSTENIBLE 96

CARMEN DÍAZ
MARÍA MARTÍN
MONTSERRAT ZAMORANO
MANUEL CARPIO

SEGUNDA SESIÓN

BLOQUE I - ACTUACIONES SOSTENIBLES DEL ESPACIO URBANO

Comunicaciones

CONDUCCIÓN SOCIAL COOPERATIVA EN CIUDADES INTELIGENTES 111

JAMAL TOUTOUH

ANÁLISIS DE LA SENSIBILIDAD ENERGÉTICA DE LAS INSTALACIONES DE ALUMBRADO PÚBLICO EN LOS MUNICIPIOS DE LA PROVINCIA DE BADAJOZ 127

ANTONIO RUIZ CELMA
VICTORIA VÁZQUEZ GODOY
ALEJANDRO PEÑA PAREDES
MARTÍN COBOS RODRÍGUEZ

NUEVO MODELO DE CENTRO DE TRANSFORMACIÓN SUBTERRÁNEO INTELIGENTE, ADAPTADO A LAS SMART CITIES Y AL CAMBIO CLIMÁTICO 136

INÉS ARAGÜEZ DEL CORRAL
MOISÉS GARRIDO MARTÍN

ALUMBRADO PÚBLICO URBANO FOTOVOLTAICO: ANÁLISIS DE RENDIMIENTO, SOSTENIBILIDAD Y VIABILIDAD ECONÓMICA 150

RAMI D. OREJÓN-SÁNCHEZ
ALFONSO GAGO-CALDERÓN

BLOQUE II - CICLO DE VIDA DE LA CIUDAD Y SUS CONSTRUCCIONES

Comunicaciones

APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE LAS REDES DE AGUA EN LA MANCOMUNIDAD DE LA COMARCA DE PAMPLONA PARA SU APLICACIÓN EN CLIMATIZACIÓN 166

JAVIER LLORENTE

SERGIO DÍAZ DE GARAYO

JAVIER LERGA

Álvaro Miranda

BIN-CT: SISTEMA INTELIGENTE PARA LA GESTIÓN DE LA RECOGIDA DE RESIDUOS URBANOS..... 187

JAVIER FERRER

ENRIQUE ALBA

PLAN ENERGÉTICO DE METRO DE MADRID: 12 MEDIDAS DE AHORRO Y EFICIENCIA PARA SER REFERENTE MEDIOAMBIENTAL 199

DIONISIO IZQUIERDO BRAVO

SANTIAGO RINCÓN ARÉVALO

ESTIMACIÓN EN TIEMPO REAL DE LA OCUPACIÓN EN LA ZONA REGULADA DE SEVILLA 213

MIGUEL MAGAÑA SUÁREZ

ADOLFO BALLESTERO DE JUAN

FUSIÓN DE DATOS PARA LA PLANIFICACIÓN DE SERVICIOS URBANOS SOSTENIBLES - CASOS DE USO EN TRANSPORTE, MEDIO AMBIENTE Y TURISMO 224

MIGUEL PICORNELL

RICARDO HERRANZ

MANUEL ÁLVAREZ

IRIS GALLOSO

COMITÉ CIENTÍFICO

El Comité Científico del IX International Greencities Congress estuvo integrado por los siguientes miembros:

- César Bedoya Frutos, Universidad Politécnica de Madrid
- Javier Boned Purkiss, Universidad de Málaga
- Tomás Caballero Sanguino, Colegio Oficial de Peritos e Ingenieros Técnicos Industriales de Málaga
- José María Carralero García, Colegio Oficial de Arquitectos de Málaga
- José Antonio Conde Heredia, Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Málaga
- José Ramón de Andrés Díaz, Universidad de Málaga
- Alfonso Gago Calderón, Universidad de Málaga
- Cristina Gallardo Ramírez, Colegio Oficial de Arquitectos de Málaga
- María Luisa Gómez Jiménez, Universidad de Málaga
- Ester Higuera García, Universidad Politécnica de Madrid
- María Luisa López Mielgo, Colegio Oficial de Arquitectos de Málaga
- María del Pilar Mercader Moyano, Universidad de Sevilla
- Carlos Rosa Jiménez, Universidad de Málaga
- Francisco Serrano Casares, Universidad de Málaga
- José Suraña Fernández, Asociación Sostenibilidad y Arquitectura
- Antonio Vargas Yáñez, Colegio Oficial de Arquitectos de Málaga

LISTA DE AUTORES

Alba, Enrique: Universidad de Málaga.

Alcántara, Andrés F.: Centro de Cooperación del Mediterráneo UICN.

Álvarez, Manuel: Kineo Mobility Analytics, S.L.

Aragüez, Inés: Montajes Eléctricos Cuerva, S.L.

Ballester, Adolfo: Universidad de Sevilla.

Blanquer, Jorge F.: Metro de Madrid, S.A.

Cardador, Tatiana: Área de Medio Ambiente, Ayuntamiento de Málaga.

Carpio, Manuel: Pontificia Universidad Católica de Chile.

Cobos, Martín: Área de Desarrollo Sostenible, Diputación de Badajoz.

Cordovilla, Carmen: Metro de Madrid, S.A.

Cormenzana, Berta: Agencia de Ecología Urbana Barcelona.

De Diego, María Teresa: Ferrovial Agroman.

Díaz, Carmen: Universidad de Granada.

Díaz de Garayo, Sergio: Centro Nacional de Energías Renovables (CENER).

Fernández, Francisco: Corporación Empresarial Altra S.L.

Ferrer, Javier: Universidad de Málaga.

Galoso, Iris: Kineo Mobility Analytics, S.L.

García, Antonio: Ferrovial Agroman.

Garrido, Moisés: Montajes Eléctricos Cuerva, S.L.

González, María del Carmen: Corporación Empresarial Altra S.L.

Gago-Calderón, Alfonso: Dpto. Expresión Gráfica, Diseño y Proyectos.
Universidad de Málaga.

Herranz, Ricardo: Kineo Mobility Analytics, S.L.

Izquierdo, Dionisio: Metro de Madrid, S.A.

Jarillo, Gabriel: Metro de Madrid, S.A.

Lerga, Javier: Mancomunidad de la Comarca de Pamplona.

Llorente, Javier: Centro Nacional de Energías Renovables (CENER).

Lloret-Gallego, Pau: Centre d'Innovació Tecnològica en Convertidors Estàtics i Accionaments(CITCEA-UPC), Departament d'Enginyeria Elèctrica, Universitat Politècnica de Catalunya.

Magaña, Miguel: AUSSA

Márquez-Ballesteros, María José: Universidad de Málaga.

Martín, María: Universidad de Granada.

Martínez, María Luisa: Hexagon España, S.A.

Medina, Luis: Área de Medio Ambiente, Ayuntamiento de Málaga.

Miranda, Álvaro: Mancomunidad de la Comarca de Pamplona.

Mora-López, Llanos: Universidad de Málaga.

Orejón-Sanchez, Rami D.: Dpto. Expresión Gráfica, Diseño y Proyectos.
Universidad de Málaga.

Peña, Alejandro: Área de Desarrollo Sostenible, Diputación de Badajoz.

Peña, José Miguel: Corporación Empresarial Altra S.L.

Picornell, Miguel: Kineo Mobility Analytics, S.L.

Rincón, Santiago: Metro de Madrid, S.A.

Rojas, Natalia: Centro de Cooperación del Mediterráneo UICN.

Ruiz, Antonio: Universidad de Extremadura.

Salvo, Á. Enrique: Laboratorio de Botánica, Universidad de Málaga.

Sidrach-de-Cardona, Mariano: Universidad de Málaga.

Sumper, Andreas: Centre d'Innovació Tecnològica en Convertidors Estàtics i Accionaments(CITCEA-UPC), Departament d'Enginyeria Elèctrica, Universitat Politècnica de Catalunya.

Toutouh, Jamal: Universidad de Málaga.

Vázquez, Victoria: Universidad de Extremadura.

Zamorano, Montserrat: Universidad de Granada.



Maria Teresa de Diego
Antonio García
Ferrovial Agroman

PROYECTO MIRE 3D: MODELIZACIÓN DE INFORMACIÓN URBANA DE ENERGÍA EN 3D

Resumen

El objetivo del proyecto es el desarrollo de un **sistema de gestión** que no sólo proporcione la visualización en 3D del comportamiento energético de los elementos clave para la mejora de la **eficiencia energética urbana**, sino que además, permita evaluar su evolución en el tiempo (4D) y el seguimiento del rendimiento de las inversiones, tanto públicas como privadas, llevadas a cabo (5D). Mire3D toma como lugar de pruebas la ciudad de Málaga.

Como parte del primer pilar del proyecto **-edificación-**, se recogerán todos los datos disponibles, tanto de fuentes abiertas (open data) como restringidas, relativas al comportamiento energético de inmuebles, del sector residencial, siguiendo la filosofía BIM. Se incluirá, por ejemplo, información del catastro, del registro de certificados energéticos, de las inspecciones técnicas de los edificios, así como de otras fuentes abiertas como son los portales inmobiliarios.

La amplia cantidad de datos recogidos **-Big Data-** serán procesados de manera que se homogeneicen y estandaricen de cara a ser volcados en una plataforma software que permita su visualización en un primer producto en dos dimensiones: el **mapa energético de la ciudad**. Este servirá de punto de partida para que se definan acciones de dinamización que impulsen la rehabilitación energética de inmuebles y para proponer soluciones inteligentes de mejora de la movilidad urbana. Para la elaboración de dicho mapa se tendrán en cuenta los requisitos necesarios para el desarrollo tecnológico del sistema de gestión de eficiencia energética que se definirá inicialmente en un barrio piloto de la ciudad de Málaga.

El resultado final, escalable a otros distritos y ciudades, supone una aplicación a escala urbana de la filosofía BIM ya habitual en otros países de la Unión Europea y es el punto de partida hacia el nuevo concepto CIM - **City Information Modelling**.

Los objetivos técnicos específicos del proyecto son:

1. Gestión avanzada de edificios y ciudades: Desarrollo de un sistema de gestión que no sólo proporcione la visualización en 3D del comportamiento energético de los edificios (elementos clave para la mejora de la eficiencia energética urbana) sino que además, permita evaluar su evolución en el tiempo (4D) y el seguimiento del rendimiento de las inversiones, tanto públicas como privadas, llevadas a cabo (5D).

2. Procesamiento de datos para la predicción y monitorización urbana (Big Data): Empleo de tecnologías Big Data en combinación con metodologías de aprendizaje automático y/o deep learning para la predicción y descubrimiento de patrones del comportamiento de la ciudad. En este proceso hay tareas intensivas en procesamiento como son el enriquecimiento de datos y la correlación de los mismos obtenidos de las distintas fuentes no heterogéneas.

3. Visualización y explotación de resultados: Desarrollar un sistema de explotación de datos masivos en tiempo real que sea ágil, eficaz y útil para el usuario final. La explotación se pretende conseguir de dos maneras complementarias: utilizando técnicas de visualización interactivas sobre grandes cantidades de datos y mediante un módulo de generación de informes sobre los análisis ejecutados.

Palabras clave: *Gestión energética; Movilidad sostenible; Eficiencia energética; Big Data; Monitorización urbana; Aprendizaje automático, Vehículo conectado.*

Área temática: *Actuaciones sostenibles del espacio urbano.*

Abstract

MIRE 3D aims at developing a **management system** that allows not only 3D visualization of the key elements related to **urban energy efficiency** but the assessment of their evolution in time (4D) and the follow-up of the investment's (public and private) yield (5D). Pilot site for the project is the city of Malaga.

Within the first pillar of the project **-buildings-** all relevant data will be gathered using both open and restricted data sources. Information will be related to the energy performance of buildings in residential sector, following the BIM methodology. Collected information will include land and energy performance certificates registries as well as other sources such as real state websites.

Data gathered **-Big Data-** will be processed to be homogenized and standardized so as to be transferred into a software platform that will allow its visualization in a first two dimensions product: the **energy map of the city**. This will serve as a starting point to define actions to boost buildings' energy refurbishment and to design smart solutions aiming at improving urban mobility. The map will take into account the requirements needed for the technological development of an energy efficiency management system, initially designed for a pilot site at Malaga city.

The project's final result, that could be scaled-up to other districts and cities, means the implementation at urban scale of BIM methodology, something common in other European countries, and it is the starting point towards a new concept: CIM - **City Information Modelling**.

Technical objectives of the project are the following:

1. Advanced management of buildings and cities: Development of a management system that will not only provide 3D visualization of the energy performance of buildings (key elements to improve urban energy efficiency) but also the assessment of their evolution in time (4D) and the follow-up of the investment's (public and private) yield (5D).

2. Data processing for urban monitoring and prediction (Big Data): Big Data technologies will be used to process the gathered data as well as machine learning methodologies will be used to predict and understand the patterns of the city behaviour. The process includes intensive processing tasks such as data enrichment and correlation of data obtained from different sources.

3. Results' visualization and exploitation: A real-time exploitation system of massive data will be developed to be agile, effective and useful for end-users. Exploitation will be achieved through two different ways: using interactive visualization techniques for big amounts of data and thanks to the generation of reports regarding the implemented analysis.

Key words: *Energy management; Sustainable mobility; Energy efficiency; Big Data; Urban monitoring; Machine learning; Connected vehicle.*

Thematic area: *Urban space sustainable actions.*

Contenido

El proyecto MIRE 3D forma parte del programa FEDER Innterconecta, destinado a fomentar la cooperación regional en investigación y desarrollo, gestionado por el Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial (CDTI) y el Ministerio de Economía y Competitividad.

1. Introducción

La iniciativa da **respuesta al problema energético** y las consecuencias medioambientales a las que se enfrenta la sociedad actual. Las ciudades consumen aproximadamente dos tercios de la energía mundial, lo que representa más del 70% de las emisiones globales de CO₂. La disminución del consumo de energía y su gestión inteligente supone un requisito fundamental desde el punto de vista medioambiental, pero también desde el económico, ya que la mejora de la **eficiencia energética urbana** se traduce en un ahorro económico tanto para la administración como para los ciudadanos.

Así, el objetivo del proyecto MIRE 3D es desarrollar de un **sistema de gestión** que no sólo proporcione la visualización en 3D del comportamiento energético de los elementos clave para la mejora de la eficiencia energética urbana, sino que además, permita evaluar su evolución en el tiempo (4D) y el seguimiento del rendimiento de las inversiones, tanto públicas como privadas, llevadas a cabo (5D).

Nos centramos en el parque inmobiliario de la ciudad, tomando como lugar de pruebas la ciudad de Málaga.

2. Metodología

El proyecto definirá y desarrollará un sistema de gestión que, basado en **metodologías BIM**, permita parametrizar la ciudad y tratarla de manera energéticamente eficiente. Este planteamiento, aplicado al sector de la edificación, es plasmado en la siguiente figura.

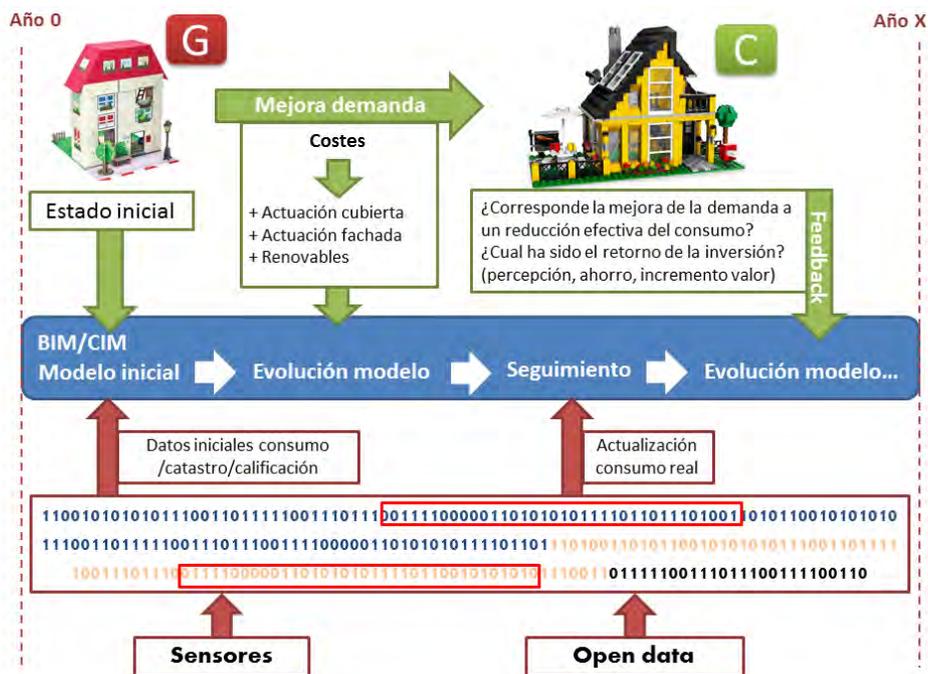


Figura 1: Esquema MIRE 3D

Para ello se recogerán todos los datos disponibles, tanto de fuentes abiertas (open data) como restringidas, relativas al parque inmobiliario de la ciudad.

Se compilará la información existente relativa al **comportamiento energético de inmuebles**, en el sector residencial. Se incluirá, por ejemplo, información del catastro, del registro de certificados energéticos, informes de las Inspecciones Técnicas de los Edificios así como de otras fuentes, como portales inmobiliarios.

La gran cantidad de datos obtenidos (Big Data) serán procesados de manera que se homogeneicen y estandaricen de cara a ser volcados en una plataforma software que permita su visualización tres dimensiones.

El resultado final, escalable a otros distritos y ciudades, supone una aplicación a escala urbana de la filosofía BIM ya habitual en otros países de la Unión Europea y es el punto de partida hacia el nuevo concepto CIM - *City Information Modelling*.

3. Objetivos técnico específicos y organización de los trabajos

3.1 Gestión avanzada de edificios y ciudades

Desarrollo de un sistema de gestión que no sólo proporcione la visualización en 3D del comportamiento energético de los edificios sino que además, permita evaluar su evolución en el tiempo (4D) y el seguimiento del rendimiento de las inversiones, tanto públicas como privadas, llevadas a cabo (5D).

Para la consecución de este objetivo se define un paquete de trabajo específico denominado "sistema de gestión avanzada en términos de eficiencia energética en edificios, distritos y ciudades", liderado por **Ferrovial Agroman**. Las principales actividades a realizar son:

- Definición de requerimientos para la modelización en términos de eficiencia energética de edificios a nivel distrito.

- Creación del modelo inicial.
- Desarrollo de herramientas para la actualización automática del modelo.
- Seguimiento y evaluación del modelo según su evolución en el tiempo.

El desarrollo planteado se enfoca de forma que los resultados obtenidos sean replicables en cualquier otra ciudad del ámbito europeo.

3.2 Procesamiento de datos para la predicción y monitorización urbana (Big Data)

Empleo de tecnologías Big Data en combinación con metodologías de aprendizaje automático y/o *deep learning* para la predicción y descubrimiento de patrones del comportamiento de la ciudad.

Wellness Telecom es la entidad que lidera el paquete de trabajo que, con el título “plataforma Big Data para la adquisición, almacenamiento e integración de información”, busca alcanzar este objetivo específico. Las principales actividades incluidas en el mismo son:

- Requisitos y diseño de la plataforma de Big Data.
- Extracción de datos.
- Clasificación, transformación y normalización de los datos de los datos.
- Enriquecimiento, correlación y almacenamiento de los datos.

3.3 Visualización y explotación de resultados

Desarrollar un sistema de explotación de datos masivos en tiempo real que sea ágil, eficaz y útil para el usuario final. La explotación se conseguirá de dos maneras complementarias: utilizando técnicas de visualización interactivas sobre grandes cantidades de datos y mediante un módulo de generación de informes sobre los análisis ejecutados.

Este objetivo específico se aborda en dos paquetes trabajo que lidera **Treelogic**. El primero de ellos, denominado “técnicas de analítica avanzada para la predicción y monitorización urbana” incluye como principales las siguientes tareas:

- Análisis y pre-procesado de la información.
- Extracción de nuevas características.
- Selección y desarrollo de algoritmos.
- Entrenamiento y validación de los modelos.
- Análisis de prestaciones y resultados.

El segundo paquete de trabajo se titula “visualización interactiva y explotación de resultados en tiempo real” e incluye las actividades listadas a continuación:

- Definición de requisitos y diseño de arquitectura.
- Implementación del módulo de visualización interactiva en tiempo real.
- Implementación del módulo de reporte.

La siguiente figura esquematiza las principales tareas del proyecto así como la relación entre los paquetes de trabajo.

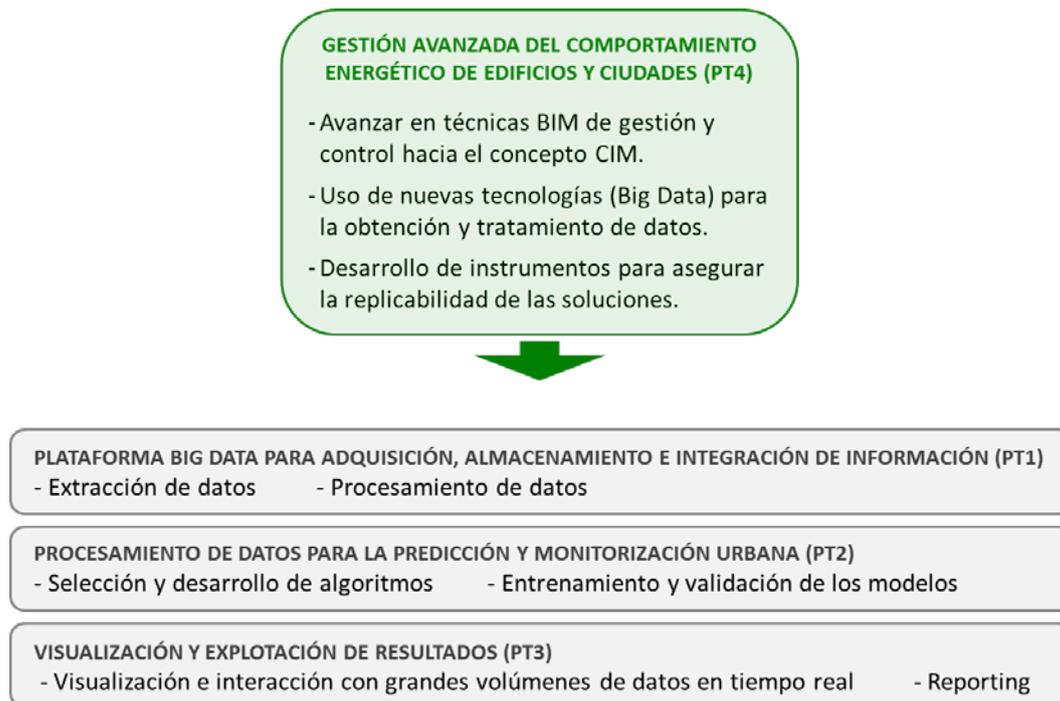


Figura 2: Paquetes de trabajo y actividades

4. Definición de servicios MIRE 3D

4.1 Gestión energética en edificaciones urbanas

En primer lugar es importante destacar que, para llegar al **modelado CIM de la ciudad** el proyecto MIRE 3D propone realizar un **sumatorio de modelos BIM**. Este enfoque permite ir incorporando modelos en función de su desarrollo, resultando más operativo de cara a escalar el sistema más allá de la zona piloto de trabajo y de extrapolarlo a otras ciudades.

Estos modelos BIM son, por otra parte, una fuente más de datos alimentando la **plataforma software** que aunarà información vinculada con el edificio o vivienda así como con el comportamiento energético de las edificaciones urbanas. Como fuente de alimentación se toman datos relativos al catastro, Certificados Energéticos, Inspecciones Técnicas de los Edificios, características de los inmuebles, consumos energéticos, precios de venta por metro cuadrado de viviendas, etc. En la actualidad esta información está desagregada por lo que resulta difícil tener una imagen clara del comportamiento energético de un barrio e incluso de un edificio aislado, o conocer las características asociadas al inmueble. Esta plataforma, y los servicios asociados a la misma, trabajarán a su vez como fuente de datos para la definición de nuevos modelos BIM urbanos.

El reto de avanzar hacia una economía baja en carbono, reduciendo nuestra dependencia energética, implica una transformación del parque edificado. El reto del proyecto MIRE3D es diseñar activos de visualización que ayuden al ciudadano a formar parte de esa transformación.

Así, en el pilar de eficiencia energética en edificación, la plataforma recogerá y gestionará información proveniente de distintas fuentes generando como resultado una plataforma en la que el usuario puede recabar, de una forma muy visual e intuitiva, toda la información relativa a una vivienda, edificio, barrio o ciudad enfocado a la toma de decisiones de medidas para la mejora de la eficiencia energética mediante la rehabilitación de la vivienda o edificio, Mediante

el análisis en el tiempo de los parámetros de eficiencia energética, estado estructural del edificio, revaloración de la vivienda el usuario puede conocer si es necesaria una intervención y de cuál profunda ha de ser para conseguir una mejora energética y sea eficiente.

A continuación se resumen las características principales de las funcionalidades o servicios de la plataforma MIRE 3D orientados a fomentar la eficiencia energética en edificaciones urbanas.

- **Servicio 1: Modelo CIM y capa de visualización libre en 3D.**

Comunicado con la plataforma, intercambia datos con ella de manera bidireccional, esto es, de la plataforma se tomarán datos para definir nuevos modelos BIM que a su vez volcarán nueva información en la plataforma. El modelo CIM permitirá la visualización de la información de forma que esta pueda ser entendida y analizada de manera sencilla.

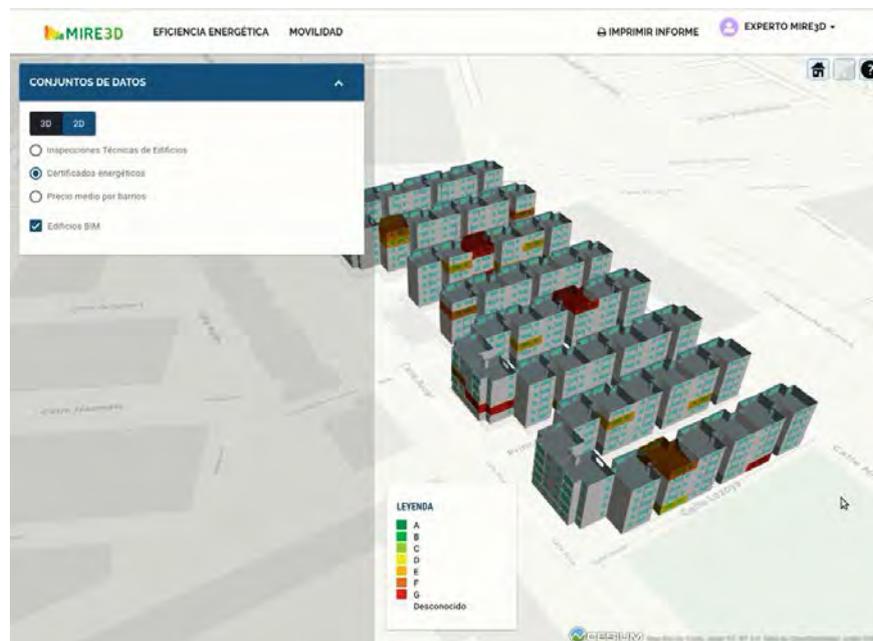


Figura 3: Visualización de modelos BIM

- **Servicio 2: Plataforma de visualización de los edificios.**

El objetivo de este servicio es el de recoger, estandarizar y visualizar los datos que definen las características generales de los inmuebles así como los relevantes desde el punto de vista de su comportamiento energético..

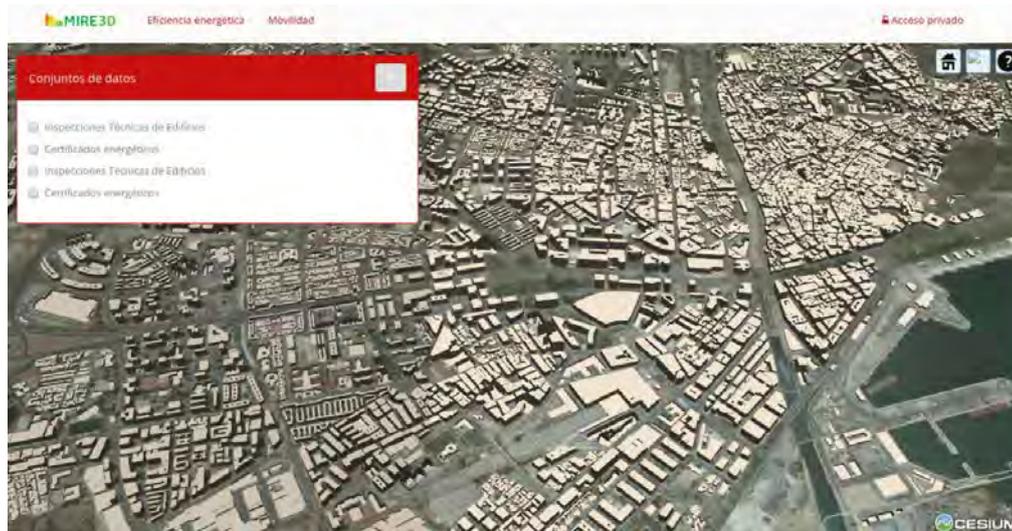


Figura 4 Plataforma de visualización

- **Servicio 3: Mapa energético de la zona de trabajo.**

Esta funcionalidad permitirá comparar y visualizar en tiempo real consumos y demandas energéticas de edificios. Para ello será necesario recoger y actualizar una serie de datos que se consideran dinámicos, dado que sus valores varían a corto plazo. El mapa toma el edificio con unidad de medida.

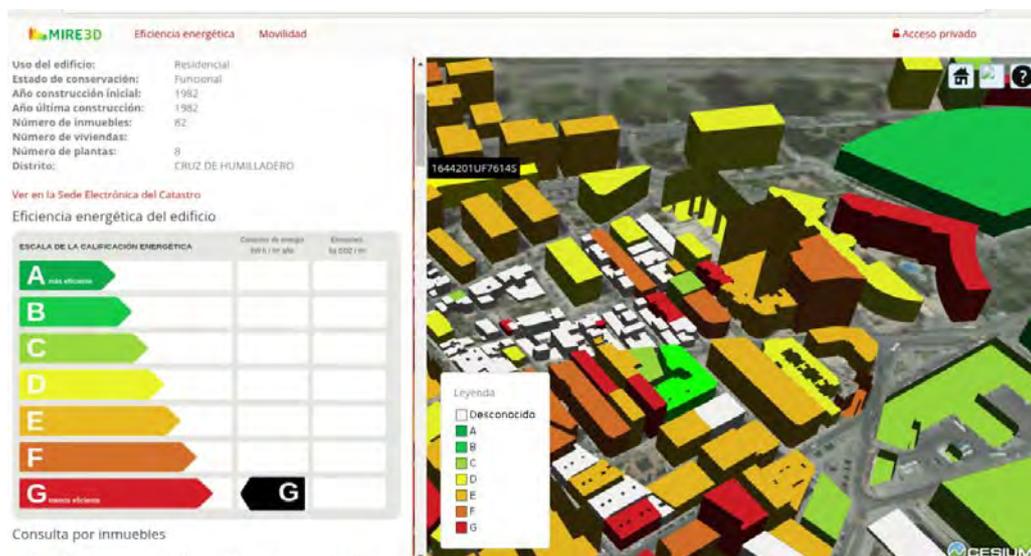


Figura 5: Visualización mapa de demanda energética

- **Servicio 4; Mapa de Inspección Técnicas de Edificios.**

Esta funcionalidad permite al usuario conocer el estado del edificio para poder valorar si es conveniente una intervención en el mismo o bien aplazarlo en el tiempo.

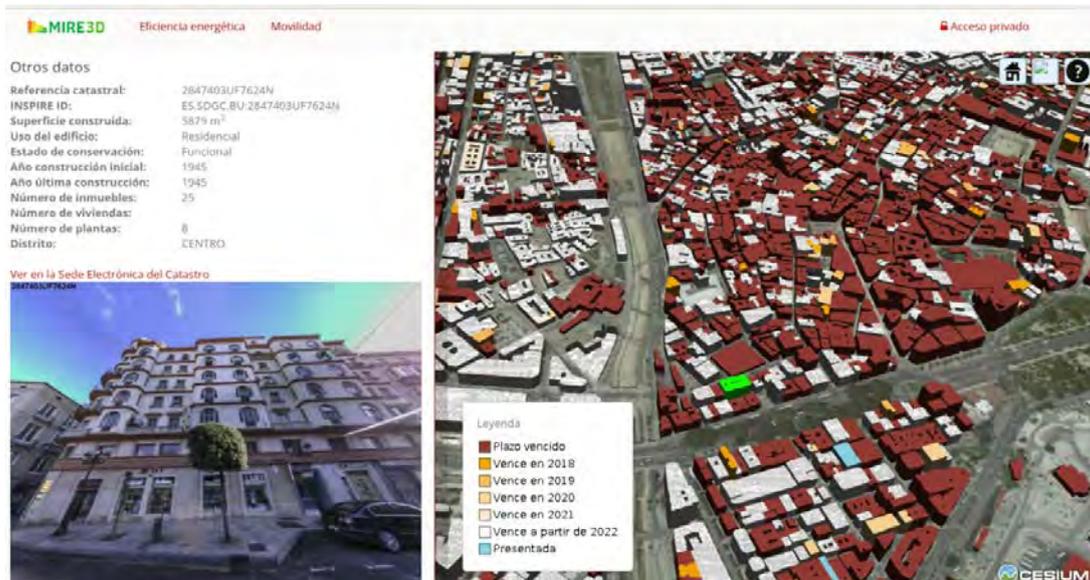


Figura 6: Visualización mapa vencimiento de la Inspección Técnica de Edificios - Servicio 5: Mapa de precio de venta.

La necesidad de desarrollar estrategias de dinamización para generar la demanda en la rehabilitación energética hacia entornos sostenibles, transmitiendo las ventajas que aporta la intervención, pasa necesariamente por la valoración del precio de la vivienda. En este sentido es preciso distinguir entre valor de una vivienda y precio de tasación de la misma. Identificar estos valores ha sido el objetivo de esta funcionalidad.

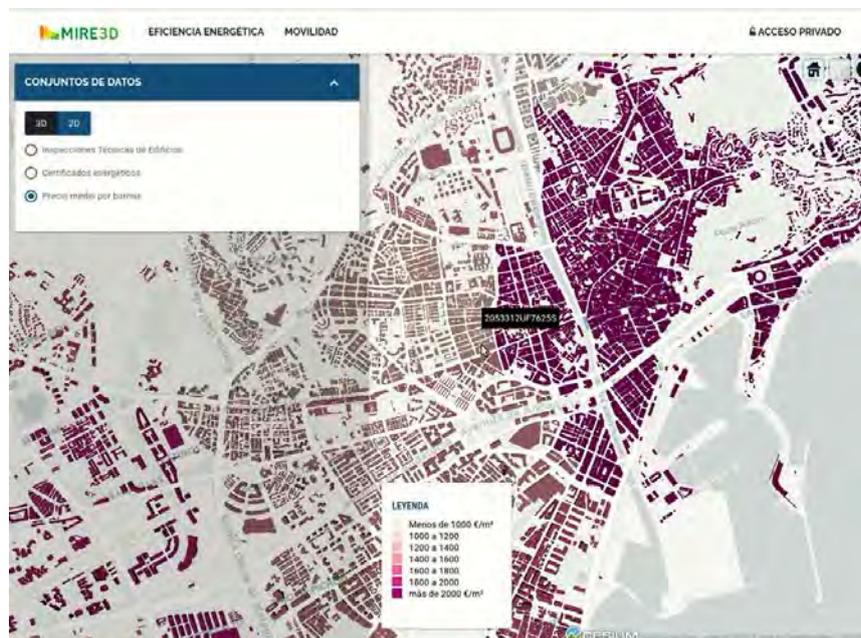


Figura 7: Visualización mapa precios medios de venta por distritos

- Servicio 6: Revalorización de la vivienda.

El usuario con esta herramienta podrá evaluar la viabilidad económica de varios tipos de intervención o rehabilitación de la vivienda / edificio para conseguir una eficiencia energética determinada.

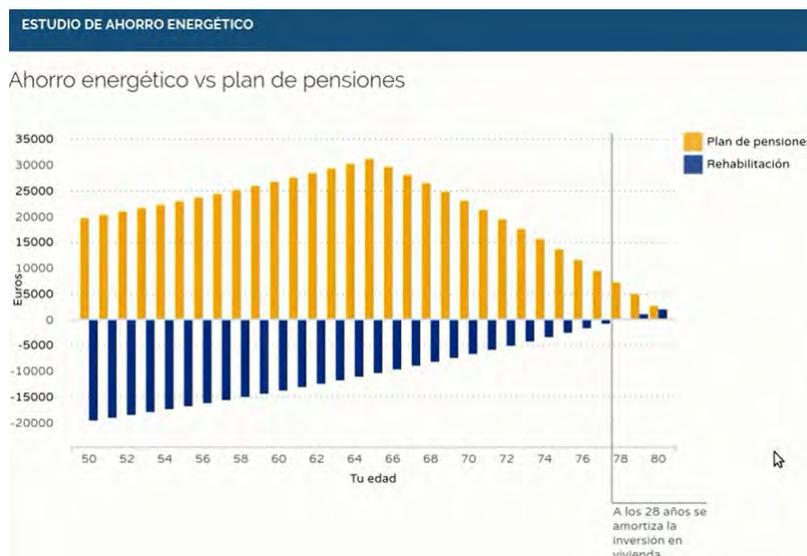


Figura 8: Visualización del ahorro energético frente a un plan de pensiones

5. Resultados esperados

- Reducir el consumo energético de las ciudades.
- Concienciar a los ciudadanos en materia de eficiencia energética.
- Promover una economía baja en carbono.
- Dar una imagen clara del comportamiento energético de un barrio, a escala edificio.
- Monitorizar las inversiones realizadas para mejorar la eficiencia a escala urbana.

6. Conclusiones

El éxito del proyecto MIRE 3D permitirá contar con un conocimiento exhaustivo en términos de eficiencia energética de la situación real, y su evolución en el tiempo, del parque de viviendas de una ciudad. Así, no sólo se podrá conocer el nivel de éxito de las inversiones ya realizadas, sino que además, se podrá plantear y financiar de forma más eficiente las futuras intervenciones que se vayan a llevar a cabo.

Este nuevo enfoque permitirá, por una parte, transformar el sector de la rehabilitación edificatoria, hacia uno tecnológicamente más avanzado. Así, las empresas españolas podrán incrementar su competitividad en el ámbito nacional e internacional, mejorándose la eficiencia energética de las ciudades y el confort y la calidad de vida de sus ciudadanos.

El sistema de gestión MIRE 3D será replicable en otras ciudades tanto españolas como europeas y es un primer paso hacia la definición de modelos de información urbanos que permitan visualizar y analizar de forma sencilla datos heterogéneos de distintas procedencias.

Correspondencia (Para más información contacte con):

Nombre y Apellido: Antonio García Gómez

Teléfono: +34913008793

Fax: +

E-mail: antoniogarcia@ferrovial.com

Cesión de derechos

Por la presente, y como autor del trabajo mencionado arriba, cedo al Palacio de Ferias y Congresos de Málaga una licencia no-exclusiva irrevocable para imprimir, reproducir, distribuir, transmitir o comunicar de cualquier manera dicho trabajo, incluyendo el derecho de hacer modificaciones de formato. Además, afirmo que esta cesión no lesiona los derechos de terceros.



María Luisa Martínez
Hexagon España, S.A
Berta Cormenzana
*Agencia de Ecología Urbana
Barcelona*

PROYECTO SIMUE —SISTEMA DE INFORMACIÓN Y MODELIZACIÓN DEL URBANISMO ECOSISTÉMICO—

Resumen

SIMUE —Sistema de Información y Modelización del Urbanismo Ecosistémico— es un aplicativo que permite evaluar, con criterios de sostenibilidad, el grado de acomodación de un tejido urbano, una ciudad o un nuevo desarrollo urbano, a un modelo de ciudad sostenible, fundamentado en los objetivos del Urbanismo Ecosistémico.

El Urbanismo Ecosistémico representa una nueva manera de hacer ciudad. La compacidad, la complejidad, la eficiencia urbana y la cohesión social son los cuatro pilares en los que se asienta.

El proyecto SIMUE es una herramienta ideada por la Agencia de Ecología Urbana de Barcelona y desarrollada sobre el producto SIG GeoMedia®. Ésta permite calcular, visualizar de forma atractiva y evaluar los 40 indicadores geoespaciales que forman parte del Certificado del Urbanismo Ecosistémico. Este procedimiento instrumental recoge los condicionantes concretos de la Guía metodológica para los sistemas de auditoría, certificación o acreditación de la calidad y sostenibilidad en el medio urbano (D.G. de Arquitectura, Vivienda y Suelo. Centro de Publicaciones, Ministerio de Fomento, 2012).

Los usuarios, ya sean técnicos en la ordenación del territorio, urbanistas, políticos o gestores urbanos, tienen a su disposición un instrumento que ofrece una radiografía territorializada de la ciudad, pudiendo formular estrategias globales o tejer propuestas en áreas concretas según los resultados obtenidos.

Los indicadores geoespaciales pueden ser presentados no solo con un software desktop sino también con una aplicación web de Mapa Inteligente que permite analizar los resultados de forma fácil y efectiva

Las aplicaciones inteligentes Smart M.Apps son aplicaciones de mapas ligeros que resuelven problemas reales con lógica de negocio. Ofrecen una manera nueva y potente de comprender mejor los cambios y transformaciones de nuestras ciudades. Los indicadores SIMUE al ser visualizados con una M.App de Hexagon pueden combinar contenidos, realizar análisis sofisticados, y proporcionar flujos de trabajo más adaptados, fundiendo todo ello en una experiencia en tiempo real para el usuario.

Abstract

SIMUE – Ecosistemic Urbanism Information and Modelling System – is an application that allows to evaluate, under sustainability criteria, the accomplishment degree of a certain urban fabric, city or a new urban development, to the sustainable city model, based in the Ecosistemic Urbanism objectives.

The Ecosistemic Urbanism represents a new way of making city. Compactness, complexity, urban efficiency and social cohesion are the four pillars in which it is settled.

SIMUE's Project is a tool ideated by Urban Ecology Agency of Barcelona and developed on SIG Geomedia® product. It allows to calculate, to visualize in an attractive way and to evaluate the 40th geospatial indicators that integrate the Ecosistemic Urbanism Certificate. This instrumental procedure gathers the specific conditionants of the 'Methodological Guide for the quality and sustainability audit, certification and accreditation in an urban space' (G.D. of Architecture, Housing and Land. Publications center, Development Ministry, 2012).

Users, whether they are land planning technicians, urban planners, politicians or urban managers, have at their disposal a tool that offers a territorialized radiography of the city, being able to formulate global strategies or make proposals in concrete areas depending on the obtained results.

Geospatial indicators can be presented not only with a desktop software but also with a Smart Map web application that allows analyzing the results easily and effectively

Smart M.Apps smart applications are lightweight mapping applications that solve real problems with business logic. They offer a new and powerful way to better understand the changes and transformations of our cities. The SIMUE indicators displayed with a Hexagon M.App can combine content, perform sophisticated analysis, and provide more adapted workflows, fusing all this in a real-time experience for the user.

Palabras clave: *ciudad inteligente; urbanismo; sostenible; indicadores*

Área temática: Actuaciones sostenibles para el espacio urbano

1. Introducción

Las ciudades inteligentes (Smart Cities) se entienden como zonas de límites definidos desde el punto de vista geográfico y político-administrativo que otorgan primacía a las tecnologías de la información y la comunicación (TIC) con el objetivo de diseñar espacios urbanos innovadores que faciliten su desarrollo sostenible y mejoren la calidad de vida de sus habitantes.

Las ciudades inteligentes deben ser ciudades comprometidas con su entorno (ambiental, social y económico) y con capacidad de anticipación, por parte de sus organizaciones, a las incertidumbres futuras derivadas del actual modelo de producir ciudad: cambio climático, simplificación de los sistemas naturales, gran consumo de suelo, agua, materiales y energía o modelos de movilidad basados en el transporte privado, entre otras problemáticas.

Definición de Ciudad Inteligente según el grupo Técnico de Normalización 178 de Aenor (AEN/CTN 178/SC2/GT! N003):

«Ciudad inteligente (Smart City) es la visión holística de una ciudad que aplica las Tecnologías de la Informática y la Comunicación para la mejora de la calidad de vida y

la accesibilidad de sus habitantes y asegura un desarrollo sostenible económico, social y ambiental en mejora permanente.

Una ciudad inteligente permite a los ciudadanos interactuar con ella de forma multidisciplinar y se adapta en tiempo real a sus necesidades, de forma eficiente en calidad y costes, ofreciendo datos abiertos, soluciones y servicios orientados a los ciudadanos como personas, para resolver los efectos del crecimiento de las ciudades, en ámbitos públicos y privados, a través de la integración innovadora de infraestructuras con sistemas de gestión inteligente».

Para determinar si una ciudad es inteligente o no hace falta potentes sistemas de tratamiento de datos para gestionar toda la información recogida tanto de los sensores urbanos como de los ciudadanos y su interacción con la ciudad.

2. Modelo de urbanismo ecosistémico

El urbanismo como práctica social de creación y transformación de las ciudades es el instrumento que permite abordar los retos actuales: un modelo de ciudad más sostenible en una nueva era, la era de la información, el conocimiento y la hiperconectividad. Las limitaciones del urbanismo actual, sin embargo, obligan a la formulación de un nuevo urbanismo, el Urbanismo Ecosistémico (Rueda, 2012), con bases ecológicas que amplíe el foco, y permita, de ese modo, aumentar la capacidad de anticipación ante las actuales incertidumbres creadas, sobre todo, por los sistemas urbanos.

La reducción de las actuales incertidumbres sólo es posible si se reduce, drásticamente, el actual consumo de recursos y el impacto contaminante derivado. La reducción del consumo de recursos sólo puede venir de la desmaterialización de la economía con un cambio de estrategia para competir basado en la información y el conocimiento, que sustituya bienes materiales por servicios desmaterializados al máximo.

La función que mejor sintetiza esta idea es la ecuación de la sostenibilidad urbana (Rueda, 1995).

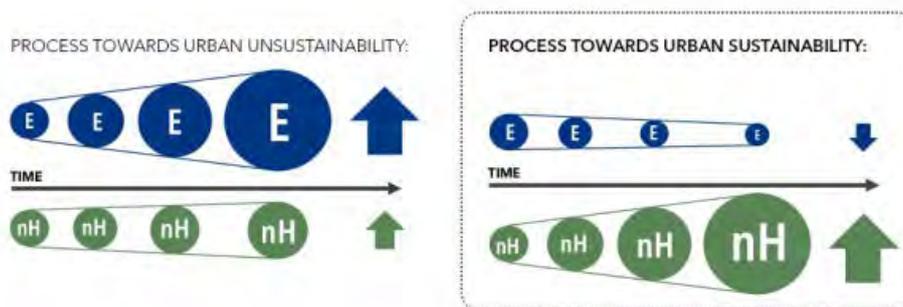


Figura 1: Función guía de la sostenibilidad

(Fuente: Agencia de Ecología Urbana)

La E como indicador del consumo de recursos nos permite evaluar el grado de sostenibilidad alcanzado. La nH , como expresión de la organización urbana, donde n es

el número de personas jurídicas¹ y H su diversidad, nos permite saber el nivel de información útil (conocimiento), que se atesora en las organizaciones urbanas, en buena medida, en las personas jurídicas densas en conocimiento.

La tendencia actual de producir ciudad responde a una secuencia temporal donde la tasa de consumo de energía es mucho mayor que la tasa de organización urbana que se obtiene: el modelo actual es claramente insostenible.

Obtener un modelo urbano más sostenible y, a la vez, un modelo de ciudad del conocimiento debería responder a una tasa de consumo energético cada vez menor y, a la vez, aumentar significativamente la tasa de organización urbana nH.

En la medida que decrece E y se aumenta nH, avanzamos hacia un modelo de ciudad más sostenible en la era de la información, es decir en la medida que se empequeñece el resultado del cociente el camino del sistema urbano hacia la sostenibilidad crece y, a la vez, crece hacia su "inteligencia".

El nivel de complejidad de los ecosistemas urbanos obliga a la formulación de modelos intencionales para el diseño de nuevos desarrollos urbanos y la regeneración de los existentes. Para que el enfoque sea integral y sistémico, BCNecología ha definido unos principios rectores que son la base del Urbanismo Ecosistémico. A su vez, para conocer el grado de implantación de los principios intencionales y, en consecuencia, del modelo urbano en cualquier ciudad o tejido urbano, se establece un conjunto de indicadores y condicionantes, es decir de restrictores que definen objetivamente (numéricamente) las reglas del juego. La pericia del sistema de restrictores reside en la selección de las variables y en los valores de referencia de cada una de ellas.

Los principios del Urbanismo Ecosistémico responden a un modelo compacto en su morfología, complejo (mixto en usos y biodiverso) en su organización, eficiente metabólicamente y cohesionado socialmente.

3. Instrumentos del urbanismo ecosistémico: indicadores para determinar el grado de equilibrio ecosistémico

Los principios y objetivos del modelo fijan la base intencional del Urbanismo Ecosistémico. Saber el grado de cumplimiento de cada uno de los principios se consigue creando un sistema de indicadores que objetivicen las intenciones expresadas. Para su evaluación, los resultados obtenidos se comparan con unos valores máximos, mínimos o ahorquillados de referencia que determinan si el sistema está equilibrado o no, si nos acercamos o nos alejamos del sistema de proporciones adecuado.

El número de variables del sistema de restrictores será ligeramente distinto si el análisis se realiza para tejidos existentes o nuevos desarrollos. La información en los tejidos existentes es mayor para algunos aspectos de la realidad urbana. Por otra parte, el análisis puede hacerse a escalas distintas que abarquen la ciudad entera o áreas con pocas hectáreas, como las supermanzanas.

La planificación urbanística suele contar con un documento normativo que fija los parámetros y condicionantes que guían la transformación del territorio a urbanizar. Los estándares y condicionantes proceden de marcos normativos de escala y naturaleza distintos con variables que son de carácter eminentemente social y económico.

¹ Se consideran personas jurídicas a las actividades económicas (formales e informales), asociaciones, instituciones y equipamientos, es decir, se incluyen todos los entes organizados radicados en los sistemas urbanos.

Para abordar los nuevos retos es necesario cambiar el enfoque y los parámetros de referencia que, sin olvidar algunas de las variables del urbanismo ortodoxo, den cobertura a los criterios de la sostenibilidad en la era de la información.

El SIMUE incorpora los indicadores del Urbanismo Ecosistémico de tal manera que cualquier persona puede evaluar la morfología y estructura urbana de las ciudades, el grado de equilibrio urbano, el grado de habitabilidad en el espacio público (variables ergonómicas, de confort y atracción), la mezcla de usos y funciones urbanas, los espacios verdes y la biodiversidad urbana o la mezcla de personas por cuestiones de renta, edad o procedencia.

La evaluación obtenida para cada indicador da idea de lo próxima o alejada que está la realidad indicada de los objetivos intencionales, es decir, de los valores de referencia. Con los cálculos realizados en varios casos prácticos (Cormenzana, 2009), se comprueba que un valor alejado del valor de referencia para determinado indicador supone, también, obtener valores alejados para otros muchos indicadores. La interdependencia entre los indicadores no es más que el reflejo de la interdependencia de la realidad y es el reflejo, también, del enfoque eco integrador que no parcelario de la propuesta.

El procedimiento de evaluación se basa en un sistema de valoración por puntos. Este sistema permite certificar la calidad y sostenibilidad de la ciudad y sus tejidos urbanos. La metodología se basa en un sistema de evaluación a partir de 41 indicadores.

4. Principios del urbanismo ecosistémico

El Urbanismo Ecosistémico incorpora dos limitaciones principales: la eficiencia y la habitabilidad urbana. Son condicionantes que se deben cumplir para que la ciudad, además de sostenible, sea agradable y atractiva para la ciudadanía que vive en ella.

La eficiencia está relacionada con la capacidad del sistema urbano para, con una organización y actividad compleja, minimizar el consumo de recursos.

La habitabilidad urbana es un constructo que está ligado a la optimización de las condiciones de la vida urbana de personas y organismos vivos y a la capacidad de relación entre ellos y el medio en el que se desarrollan. Confort e interacción son dos aspectos inseparables en el Urbanismo Ecosistémico. El primero hace referencia a las características del lugar; espacio público, residencia, equipamientos, etc., y el segundo a la condición social de los humanos y de buena parte de los seres vivos (sustancial también para los sistemas urbanos); a la cohesión social y a la diversidad biológica.

Estos principios se traducen a la realidad de la siguiente manera:

- **Compacidad:** Se propone que la planificación y la ordenación del territorio fomenten morfologías y estructuras urbanas compactas y polifuncionales, estableciendo como prioritarios, los procesos que promuevan el reciclaje de tejidos urbanos existentes, la recuperación de suelos en desuso en el interior de los ámbitos urbanos o los procesos de redensificación de suelos urbanizables de carácter disperso. Determinada compacidad permite reunir, en un mismo espacio, suficiente masa crítica de personas y personas jurídicas con el fin de incitar intercambios y nuevas relaciones comunicativas entre personas, entes y actividades.
- **Equilibrio urbano:** Conseguir las mezclas adecuadas entre los espacios dedicados a mantener organizada y en funcionamiento la ciudad (el espacio edificado) y los espacios dedicados a la estancia, el ocio y el relax (el espacio público de uso ciudadano).
- **Accesibilidad versus movilidad privada:** Fomentar los transportes alternativos al coche, garantizando el acceso a la ciudad de todos los ciudadanos. El

porcentaje de espacio público con prioridad para el peatón no debería ser menor al 70 %.

- **Habitabilidad en el espacio público:** Asegurar el confort del espacio público a través del control de las variables de entorno: ruido, calidad del aire y confort térmico. Atracción del espacio público a partir de la implantación de los servicios básicos para residentes, la diversidad de las personas jurídicas y la presencia del verde. Conseguir un espacio público con buena ergonomía, destinando la mayor parte del espacio para usos distintos a la movilidad de paso y con buena accesibilidad.
- **Complejidad urbana:** Aumentar la complejidad urbana incrementando el número y la diversidad de personas jurídicas, especialmente de aquellas que son densas en conocimiento o actividades @.
- **Verde versus asfalto:** Incrementar la superficie verde y la biodiversidad urbana. Reverdecer las ciudades y reducir el índice de impermeabilización en los tejidos existentes. Crear una red verde entre las diferentes matrices de la ciudad con un entramado de itinerarios peatonales de enlace.
- **Autosuficiencia versus dependencia:** La ciudad según el Urbanismo Ecosistémico será neutra en carbono y tendrá un alto porcentaje de autosuficiencia energética. Será también autosuficiente en recursos hídricos incluso en un escenario de escasez derivado del cambio climático. Se aplica recogida selectiva y la mayor parte de la fracción orgánica se utiliza para hacer compost.
- **Cohesión social:** Fomentar la convivencia social mezclando rentas, culturas y edades. Garantizar el acceso universal a una vivienda digna, en edificios más sostenibles. Dotación y distribución equilibrada de equipamientos básicos.

5. Sistema de modelización e información del urbanismo ecosistémico (Simue)

SIMUE es una herramienta que permite calcular, visualizar y evaluar los indicadores del Urbanismo Ecosistémico. Cada indicador tiene un formulario de entrada de datos, manejable e intuitivo, donde el usuario selecciona la fuente de datos geográficos primarios. El resultado arrojado es un mapa temático, usando colores y patrones para mostrar las características espaciales y la distribución de entidades; la representación puede ser por entidad lineal (tramo de calle), poligonal (parcelas, barrios, grid) o por punto (población, arbolado, etc.).

El SIMUE es un aplicativo que permite convertir información en conocimiento. Los datos requeridos, hoy en día descentralizados en varios departamentos municipales, se integran en un único entorno y se tratan para conseguir información con valor añadido. El programa incorpora, a través de los indicadores, lógicas y métodos contrastados y coherentes a un modelo de ciudad más sostenible.

Además, el programa SIMUE permite evaluar el área objeto de estudio, a través de un sistema de valoración por puntos, según el grado de acomodación del proyecto o tejidos urbanos al modelo de ciudad más sostenible.

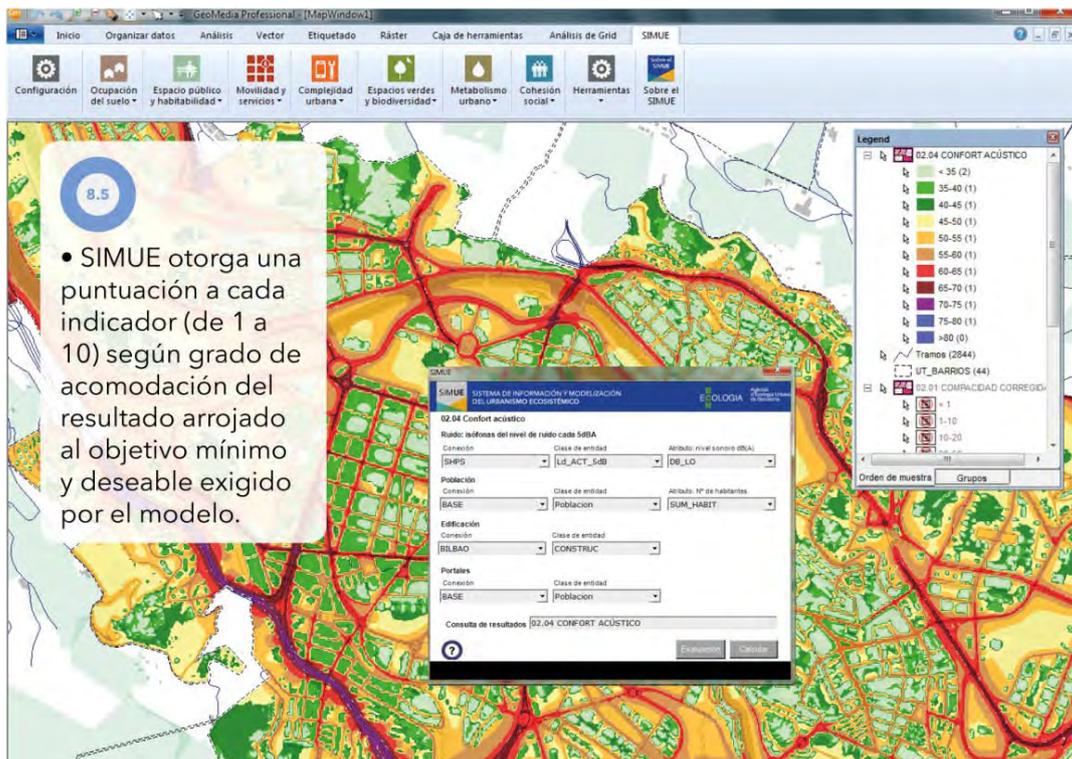


Figura 2: Indicador de confort acústico.

(Fuente: Agencia de Ecología Urbana)

Los ámbitos evaluados del SIMUE son:

- **A1. Ocupación del suelo**

Evalúa la intensidad edificatoria de los tejidos urbanos en términos de densidad de viviendas y compactad

- **A2. Espacio público y habitabilidad**

Evalúa el equilibrio entre el espacio construido y el espacio libre, y la habitabilidad en el espacio público en términos de accesibilidad, confort y atracción.

- **A3. Movilidad y Servicios**

Evalúa la configuración de las redes de movilidad (a pie, transporte público, bicicleta, vehículo privado) así como su funcionalidad. También mide la dotación de infraestructuras.

- **A4. Complejidad urbana**

Evalúa la mezcla de usos y funciones de los tejidos urbanos , la dotación de actividades densas en conocimiento y actividades de uso cotidiano y la continuidad espacial y funcional de las calles.

- **A5. Espacios verdes y biodiversidad**

Evalúa la infraestructura ecológica como sistema de soporte a la vida (parques y jardines, huertos urbanos, arbolado, cubiertas verdes etc.) y la conectividad de la estructura de la red verde.

- **A6. Metabolismo urbano**

En una primera fase evalúa la proximidad a puntos de recogida de residuos y puntos limpios (gestión de residuos) En una segunda fase evaluara la eficiencia y autosuficiencia de los flujos metabólicos (energía, agua y materiales).

- **A7. Cohesión social**

Evalúa el grado de Convivencia entre los grupos de personas con rentas, culturas y edades distintas que viven en la ciudad. También se parametriza la dotación de equipamientos básicos y de vivienda protegida, así como su distribución espacial.



Figura 3: Organización del SIMUE.

(Fuente: Agencia de Ecología Urbana de Barcelona)

6. Smart M.Apps: Mapa Inteligente

Concepto de indicadores Geospaciales son indicadores que basándose en los datos del territorio nos dan los resultados de un determinado indicador.

Estos indicadores geospaciales pueden ser presentados no solo con un software desktop sino también con una aplicación web de Mapa Inteligente que permite analizar los resultados de forma fácil y efectiva.

Las aplicaciones inteligentes Smart M.Apps son aplicaciones de mapas ligeros que resuelven problemas reales con lógica de negocio. Ofrecen una manera nueva y potente de comprender mejor los cambios y transformaciones de nuestras ciudades. Los indicadores SIMUE al ser visualizados con una M.App de Hexagon pueden combinar contenidos, realizar análisis sofisticados, y proporcionar flujos de trabajo más adaptados, fundiendo todo ello en una experiencia en tiempo real para el usuario.

La visualización de los indicadores para proporcionar un estudio óptimo de los mismos y una interrelación entre ellos debe ser mediante Mapas Inteligentes

Y por supuesto en una aplicación web, donde no sea necesario la instalación de una herramienta o programa en el terminal desde donde se quiere acceder a los datos

El acceso puede ser por usuario y contraseña, pero universal, es decir independiente del navegador.

La información será estructurada y relevante

La arquitectura de la aplicación se basa en 3 niveles y está orientada a servicios (SOA)

- **Capa Cliente o de presentación de datos:** interficie de usuario, interacción instrucciones y resultados
- **Capa de Servicios o de negocio:** funciones, procesamiento y operaciones
- **Capa de información o de manejo de datos:** gestión de datos, acceso a los mismos almacenamiento y recuperación

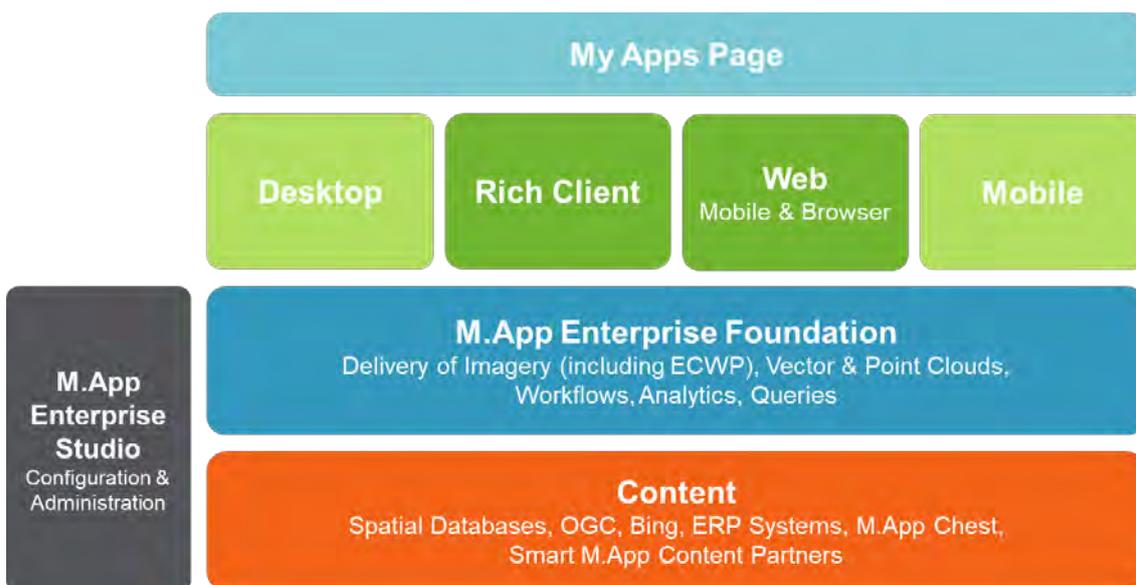


Figura 4. M.App Enterprise Map Production.

Fuente Hexagon

Como se puede ver en la arquitectura, las plataformas de creación de la Smart App dependen de que exista previamente una base de datos a la que poder conectarse en la que esté estructurada toda la información que se quiere visualizar y/o analizar. Por tanto, hay que crear una capa de información con la base de datos con las siguientes prestaciones:

- Soportar el cálculo y la actualización de la información cartográfica de los diferentes indicadores.
- Soportar operaciones básicas de consulta, de explotación y de interrelación de informaciones.

- Permitir generar cartografía general, sectorial y temática.
- Publicar los datos de los diferentes indicadores en Internet.

En esta comunicación se presenta un ejemplo prototipo de una Smart App sobre unos de los indicadores: **El índice de habitabilidad** de una zona geográfica de la ciudad de Barcelona.

7. Índice de habitabilidad en el espacio público

El espacio público es el elemento estructural de un modelo de ciudad más sostenible. Es el espacio de convivencia ciudadana y forma, juntamente con la red de equipamientos y espacios verdes y de estancia, los ejes principales de la vida social y de relación.

Hoy en día la mayor parte del espacio público está limitado por las funciones asociadas al transporte motorizado. Esta realidad deriva de una planificación del espacio público poco flexible, que afecta directamente a la convivencia, factor de gran importancia para fomentar ciudades inclusivas y habitables. Son varios los indicadores que dibujan hoy ciudades al límite de su capacidad con relación a la calidad de vida de las personas: altos niveles de contaminación atmosférica, ruido, alta accidentalidad viaria, déficit de espacios de relación...

La redefinición del modelo urbano requiere instrumentos y metodologías que consideren la escala humana como factor de análisis, que incluyan de forma más integral, una valoración de las calles y de su potencial como espacio de relación, vinculando aspectos como la accesibilidad universal, las variables de confort, la seguridad o las variables de atracción.

El **índice de habitabilidad en el espacio público (IHEP;** Agencia de Ecología Urbana de Barcelona) expresa la proporción de trama urbana que presenta unas condiciones adecuadas de habitabilidad. Este índice consiste en un sistema de evaluación integral de nueve variables que condicionan la percepción positiva de las calles por parte de los ciudadanos. Estas variables se clasifican en ergonómicas, de confort o fisiológicas y atractivas.

Variables ergonómicas (15 puntos máximos)			
Espacio viario destinado al peatón (% metros lineales)	Accesibilidad del viario (según ancho de las aceras y pendiente longitudinal -P-)	Proporción de la calle (relación h/d)	
5 ≥80%	5 2 aceras ≥2,5 m P<5%	5 <0,5	
4 ≥60 y <80%	4 2 aceras ≥1,8 m y P<5%	4 ≥0,5 y <1	
3 ≥50 y <60%	3 1 acera ≥1,8 m y P<5%	3 ≥1 y <2	
2 ≥30 y <50%	2 2 aceras ≥1,8 m y P>5%	2 ≥2 y <3,5	
1 <30%	1 2 aceras <1,8 m y P>5%	1 ≥3,5	

Variables fisiológicas (15 puntos máximos)			
Calidad del aire (NO ₂ , PM ₁₀)	Confort acústico (dB(A) diurno)	Confort térmico (% horas útiles al día)	
5 <35 µg/m ³	5 <55 dB	5 ≥80% (+12 horas)	
4 ≥35 y <39 µg/m ³	4 ≥55 y 60 dB	4 ≥66 y <80% (10 a 12 horas)	
3 ≥39 y ≤40 µg/m ³	3 >60 y ≤65 dB	3 ≥50 y <66% (7,5 a 10 horas)	
2 >40 y <45 µg/m ³	2 >65 y 70 dB	2 ≥35 y <50% (5 a 7,5 horas)	
1 ≥45 µg/m ³	1 70 dB	1 <35% (<5 horas)	

Variables psicológicas (15 puntos máximos)			
Percepción del verde urbano (% volumen verde)	Densidad de actividades (nº actividades/100 m. lineales)	Diversidad de actividades ¹ (abundancia activ. distintas)	
5 ≥30%	5 ≥20	5 ≥0,8	
4 ≥20 y <30%	4 ≥10 y <20	4 ≥0,6 y <0,8	
3 ≥10 y <20%	3 ≥5 y <10	3 ≥0,4 y <0,6	
2 ≥5 y <10%	2 ≥2 y <5	2 ≥0,2 y <0,4	
1 <5%	1 <2	1 <0,2	

¹ Para cada tramo: [Nº actividades distintas/Nº total actividades] x factor ponderación (densidad de actividades).
Factor de ponderación: **1** (≥20 actividades/100 m. lineales), **0,75** (10-20/100 m. lineales), **0,5** (5-10/100 m. lineales), **0,25** (2-5/100 m. lineales) y **0** (<2 actividades/100 m. lineales).

Figura 5: Variables del índice de habitabilidad.

Fuente: Agencia de Ecología Urbana de Barcelona

Las variables ergonómicas inciden sobre el desplazamiento y movimiento de las personas en el espacio público. Se toman en consideración los siguientes indicadores: Espacio viario destinado al peatón, Accesibilidad del viario y Proporción de la calle.

Las variables de confort inciden sobre el bienestar de las personas y evalúan los niveles de confort fisiológico. Se toman en consideración los siguientes indicadores: Calidad del aire, Confort acústico y Confort térmico.

Finalmente, las variables atractivas, inciden sobre el grado de atracción de las personas en la calle. Se toman en consideración los siguientes indicadores: Densidad de actividades en planta baja, Diversidad de actividades y Percepción visual del verde urbano.

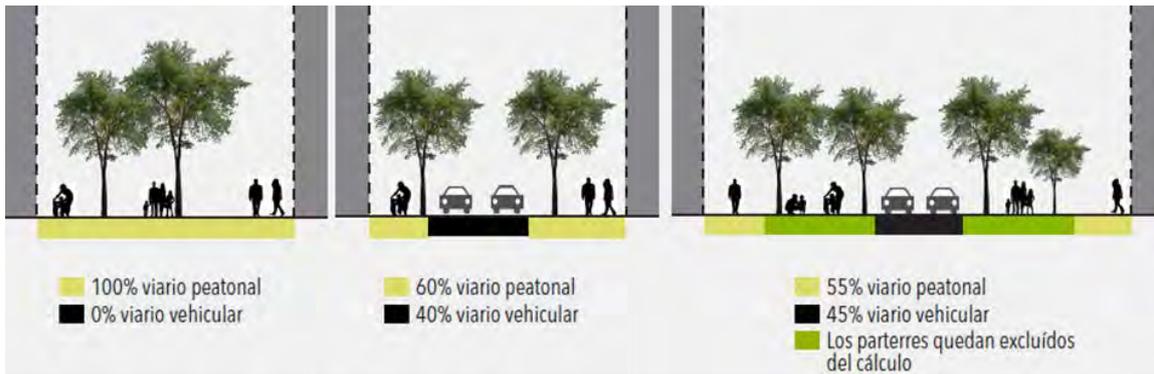


Figura 6. Espacio viario destinado al peatón.

Fuente: Agencia de Ecología Urbana de Barcelona

Estas variables se calculan según unos 9 índices por tramo de calle y se extrapola a una malla de un determinado tamaño, por ejemplo, 200x200m y finalmente se obtiene el grado de cumplimiento para cada índice en cada celda.

Abajo los rangos de cumplimiento:

Índice	Rangos de cumplimiento
Índice de habitabilidad en el espacio público (IHEP)	<p>0% – 65%: Sin cumplimiento (Non)</p> <p>65% – 80%: Cumple con el objetivo mínimo (Min)</p> <p>80% – 100%: Cumple con el objetivo óptimo (Opt)</p>
Accesibilidad del viario (según ancho de acera)	<p>0% – 90%: Sin cumplimiento (Non)</p> <p>90% – 99%: Cumple con el objetivo mínimo (Min)</p> <p>99% – 100%: Cumple con el objetivo óptimo (Opt)</p>
Calidad del aire Confort acústico	<p>0% – 75%: Sin cumplimiento (Non)</p> <p>75% – 99%: Cumple con el objetivo mínimo (Min)</p>

	99% – 100%: Cumple con el objetivo óptimo (Opt)
Confort térmico	0% – 50%: Sin cumplimiento (Non)
Espacio viario destinado al peatón	50% – 75%: Cumple con el objetivo mínimo (Min)
Proporción de la calle	75% – 100%: Cumple con el objetivo óptimo (Opt)
Percepción del verde urbano	
Densidad de actividades	
Diversidad de actividades	

Tabla 1. Categorías según grado de cumplimiento para los indicadores del índice de habitabilidad.

Fuente Agencia Ecología Urbana de Barcelona

El grado de cumplimiento de los diferentes índices con respecto al modelo es lo que se muestra en las Apps creadas que se pueden visualizar vía web

A continuación, se describen las formulas utilizadas para los diferentes índices de la Tabla 1. que serán representados en la Smart App creada:

Calidad del aire:

% = [Población expuesta a niveles de inmisión permitidos / Población total]

Confort acústico:

% = [Población con afectación sonora inferior a 65dB diurnos y 55 dB nocturnos / Población total]

Confort Térmico:

% = [Tramos de calle (metros lineales) con potencial de confort en verano superior al 50% / Tramos de calle totales]

Espacio viario destinado al peatón:

% = [Espacio viario peatonal / Espacio viario peatonal + Espacio viario vehicular] x 100

Accesibilidad del viario:

% = [Tramos de calle (metros lineales) accesibles (accesibilidad suficiente, buena u óptima) / Tramos de calle totales] x 100

Proporción de la calle

% = [Altura media de la edificación / Distancia entre fachadas]

Percepción visual del verde urbano

% = [Σ Volumen de las copas¹ de los árboles / Volumen visual de la calle] x 100

Densidad de actividades por tramo

$N^{\circ}/100 \text{ metros lineales} = [100 \times N^{\circ} \text{ actividades en planta baja} / \text{longitud total del tramo de calle (metros lineales)}]$

Diversidad de actividades:

Factor de ponderación = $[N^{\circ} \text{ actividades distintas} / N^{\circ} \text{ total de actividades}] \times \text{factor de ponderación}$

Índice de habitabilidad en el espacio público

$IHEP = [\Sigma PV \text{ ERGONÓMICAS} + \Sigma PV \text{ FISIOLÓGICAS} + \Sigma PV \text{ ATRACCIÓN}]$

8. Alcance del prototipo: Índice de habitabilidad

Livability App

Visualizar los resultados de indicadores de urbanismo ecosistémico relativos al índice de habitabilidad previamente generados, y a su vez permitir hacer un análisis visual de cómo los diferentes indicadores se influyen entre sí.

La Smart App se llama “**Livability App**”

El alcance se limita al tejido urbano del Eixample de Barcelona

“**Livability App**” es un servicio web de fácil acceso que permite visualizar, consultar y analizar información de los indicadores relativos al índice de habitabilidad del tejido urbano del Eixample de Barcelona.

Se podrá analizar cuál es la calidad del aire en diferentes zonas, el confort acústico o la accesibilidad de sus calles en otros indicadores. Desde **Livability App** será posible analizar la distribución de los diferentes indicadores y cómo los diferentes indicadores se influyen entre sí.

La aplicación está dirigida tanto a profesionales del sector como para particulares. No será necesario instalar ninguna aplicación adicional, con un simple clic en el navegador de internet el usuario conectado a internet podrá acceder a la cartografía publicada mediante las utilidades y herramientas de visualización y navegación permitiendo interactuar con los mapas que contienen la información geográfica.

La finalidad de la Smart M.App **Livability App** es crear un visor web cartográfico para integrar como un componente más en el Sistema de Información Geográfica de la ciudad de Barcelona

El usuario final necesita un conocimiento básico sobre navegación en páginas web ya que la es intuitiva y fácil de usar. Generalmente serán habitantes y organismos interesados en visualizar información de los diferentes de indicadores de habitabilidad en su ciudad. Ingresa en la aplicación web mediante usuario y contraseña.

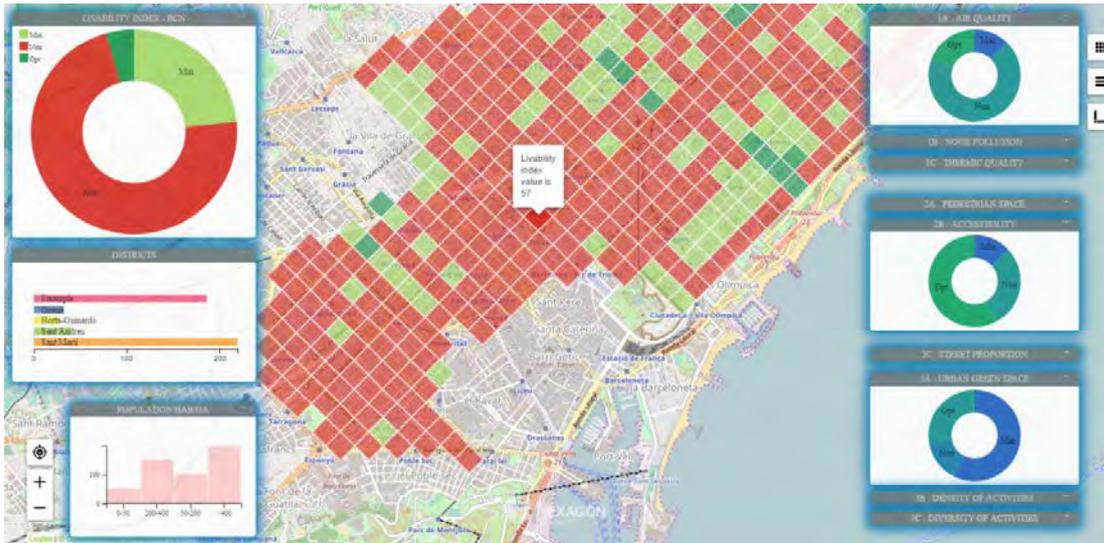


Figura 7. Apariencia de la aplicación Smart App: Livability Index

Las distribuciones dentro de los diferentes gráficos si están sincronizadas entre sí y con la distribución del mapa, por ejemplo, si seleccionamos el distrito del Eixample en el gráfico, en el mapa sólo se mostrarán las cuadrículas pertenecientes al distrito del Eixample.

Como podemos ver la distribución cuando seleccionamos solo el Eixample nos indica que en el Eixample hay más zonas que no cumplen con los requisitos mínimos según el modelo SIMUE.

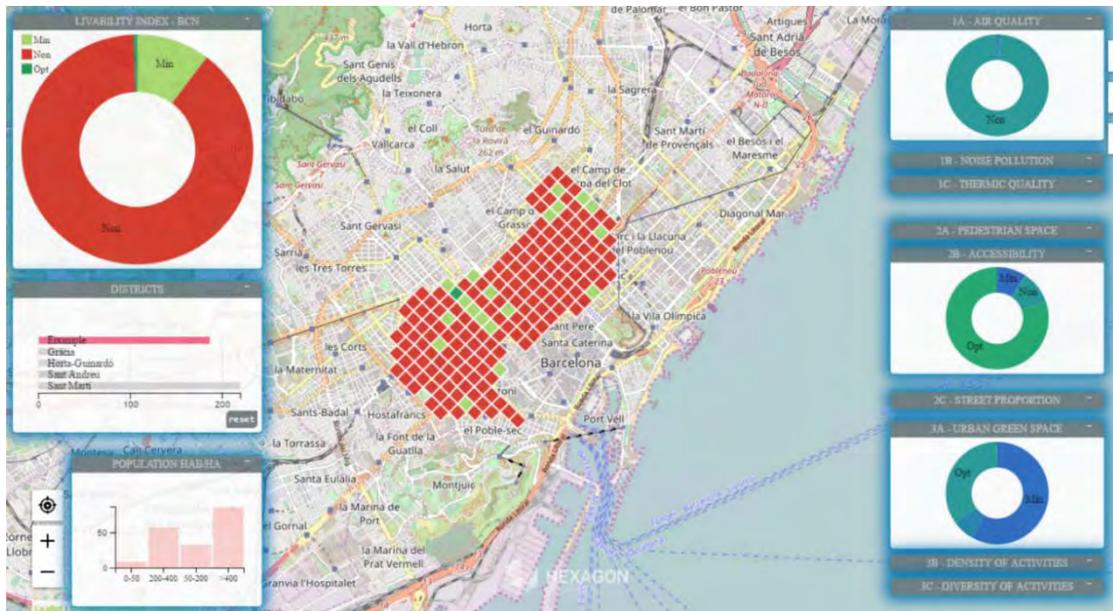


Figura 8. Situación del distrito del Eixample según los datos

La malla en la que está dividido el territorio, de 200x200m nos permite asignar a esa malla el valor del índice y poder visualizarlo fácilmente por colores.

A continuación, podemos explicar cómo sería el uso de la Smart App **Livability App** si un usuario autorizado entrase en la aplicación.

El usuario va a poder analizar los diferentes indicadores de la zona a estudiar y su relación entre ellos. Por ejemplo se puede visualizar en que retículas se cumple que los valores de habitabilidad sean mínimos y en cuáles de ellos además hay una mala calidad del aire o cualquier otro de los índices representados justo en las retículas representadas en color verde que significa que tienen un valor Min del índice de habitabilidad.



Figura 9. Situación de las retículas con un valor Min de Livability Index

En todas las tablas se puede hacer reset y deshacer las condiciones de selección previas.

Veamos ese caso de uso en forma de tabla con las posibilidades de un usuario trabajando con la aplicación

CASO DE USO: Análisis de la información mediante gráficos interactivos	
Descripción	<p>Este caso de uso describe como el usuario puede:</p> <ul style="list-style-type: none"> • analizar de forma visual cómo varían los indicadores en los diferentes distritos y otras delimitaciones de carácter estadístico como es la distribución de la población en función de su edad, etc. • analizar de forma visual cómo se influyen los diferentes indicadores entre sí
Actores	Usuario con permisos para la aplicación
Precondición	Que toda la información que se quiere analizar interactivamente mediante gráficos esté almacenada en tablas de atributos
Flujo principal	<ol style="list-style-type: none"> 1. El usuario hace clic en una sección del gráfico interactivo 2. En la tabla de atributos se seleccionan sólo los registros que tienen ese valor en ese campo de la tabla de atributos 3. En el mapa sólo se visualizan las áreas de los registros seleccionados 4. La distribución de los valores en los diferentes gráficos se modifica automáticamente para adaptarse al nuevo número de registros
Flujos alternativos	El usuario pincha en más de una sección del gráfico interactivo. En este caso se seleccionarán todos los registros que tengan el valor de alguna de las dos secciones seleccionadas
Postcondición	Debe existir un botón "Reset" para des-seleccionar la sección seleccionada en el gráfico

Requerimientos funcionales	no	Licencia para la utilización del software Hexagon
----------------------------	----	---

Tabla 2. Caso de uso: Análisis de la información mediante gráficos interactivos

9. Conclusiones

La necesidad de disponer de una base sólida para abordar la fijación de unos criterios e indicadores de sostenibilidad en el medio urbano ha venido siendo demandada desde todos los ámbitos relacionados con la planificación urbana.

La herramienta SIMUE incorpora un modelo intencional en su fundamento, el Urbanismo Ecosistémico, basado en unos principios, que se vierten en un procedimiento instrumental en forma de indicadores.

En tanto que las ciudades son sistemas complejos, SIMUE integra todos y cada uno de los componentes estratégicos de transformación futura de las ciudades: los usos y funciones urbanas, el espacio público y la movilidad, los espacios verdes, el metabolismo urbano, la complejidad urbana y la cohesión social.

SIMUE permite evaluar, de un modo más objetivo y territorializado, la sostenibilidad de las actuaciones urbanísticas, tanto de transformación del medio urbano consolidado como de nuevos desarrollos urbanísticos, de acuerdo con un modelo de referencia.

La finalidad de este prototipo es demostrar a las organizaciones interesadas en valorar cualquiera de los indicadores ecosistémicos que pueden acceder a la herramienta SIMUE sin necesidad de hacer instalaciones locales con las consecuentes ventajas económicas y de prestaciones

La posibilidad de visualizar los datos en la nube y que sean accesibles de forma segura para los usuarios permitidos convierte el estudio del índice de habitabilidad de una ciudad en una experiencia muy productiva y gratificante

En este prototipo la Smart App “Livability App” ha sido creada en la nube (MapZone) de Hexagon SI y permite difundir la herramienta SIMUE sin necesidad de realizar instalaciones en local.

10. Referencias

Página oficial de la Agencia de Ecología Urbana:

<http://www.bcnecologia.net/es/sobre-bcnecologia>

Página oficial de Hexagon Geospatial

<http://www.hexagongeospatial.com/products/smart-mapp/mapp-enterprise>

Rueda S. Ecología Urbana: Barcelona i la seva Regió Metropolitana com a referents. Barcelona: Beta; 1995

Cormenzana B, et al. Plan de Indicadores de Sostenibilidad Urbana de Vitoria-Gasteiz. Agencia de Ecología Urbana de Barcelona; 2009 [Enlace publicación completa](#)

Agencia de Ecología Urbana de Barcelona. Plan de Movilidad y Espacio Público de Vitoria-Gasteiz. Agencia de Ecología Urbana de Barcelona y Ayuntamiento de Vitoria-Gasteiz; 2006. [Enlace publicación completa](#).

Rueda S. Cormenzana B. Certificación del Urbanismo Ecosistémico. Agencia de Ecología Urbana de Barcelona; 2012 [Enlace publicación completa](#)

D.G. de Arquitectura, Vivienda y Suelo. Guía Metodológica para los sistemas de Auditoría, Certificación o Acreditación de la Calidad y Sostenibilidad en el Medio Urbano. Madrid: Centro de Publicaciones, Ministerio de Fomento; 2012 [Enlace publicación completa](#)

Höldberg S. Ecosystem Urbanism Certification App. Memoria trabajo fin de Master en tecnologías de la Información Geográfica; 2017

11. Correspondencia

Para más información contacte con:

Berta Cormenzana

Teléfono: +34 93 224 08 60

Fax: + 93 224 08 61

E-mail: BertaCormenzana@bcnecologia.net

María Luisa Martínez Segarra

Teléfono: +34 91 7088800

Fax: + 93 3728021

E-mail: maria.martinez@hexagonsi.com

12. Cesión de derechos

Por la presente, y como autor del trabajo mencionado arriba, cedo al Palacio de Ferias y Congresos de Málaga una licencia no-exclusiva irrevocable para imprimir, reproducir, distribuir, transmitir o comunicar de cualquier manera dicho trabajo, incluyendo el derecho de hacer modificaciones de formato. Además, afirmo que esta cesión no lesiona los derechos de terceros.



3

Enrique Salvo Tierra
Laboratorio de Botánica. Universidad de Málaga
Natalia Rojas González
Andrés F. Alcántara Valero
Centro de Cooperación del Mediterráneo UICN
Tatiana Cardador Jiménez
Luis Medina Montoya
Área de Medio Ambiente del Ayuntamiento de Málaga

ESTUDIO DE SBN APLICABLES A UN PROYECTO DE ZONA VERDE: MODELO DE ISLAS DE BIODIVERSIDAD ALBORÁNICA PARA EL PARQUE COMANDANTE BENÍTEZ (MÁLAGA)¹

Resumen

Se realiza una revisión del concepto de Soluciones basadas en Naturaleza como fórmula para corregir la intensificación de impactos de la actividad antrópica en un territorio tan sensible como el Arco de Alborán, ejemplificándolo en los modelos de zonas verdes urbanas.

Abstract

A revision of the concept of Solutions based on Nature is made as a formula to correct the intensification of impacts of anthropic activity in a territory as sensitive as the Arc of Alboran, exemplifying it in the models of urban green areas.

Palabras clave

Cambio climático, servicios ecosistémicos, disponibilidad hídrica, idoneidad de especies.

Key words

Climate change, ecosystem services, water availability, species suitability.

Área temática

Actuaciones sostenibles del espacio urbano.

1. Los servicios ecosistémicos (SSEE) y las soluciones basadas en la naturaleza (SbN)

El concepto de SSEE surgió a finales de los años sesenta como forma implicar a los gestores territoriales sobre la fuerte interrelación entre el bienestar humano y el mantenimiento de las funciones básicas de los ecosistemas y su valorización (Balvanera & Cottler, 2007). Los SSEE se definen en el Informe de la Evaluación de los Ecosistemas del Milenio (Montes & Sala, 2007), como los beneficios que los seres humanos obtienen de los ecosistemas, distinguiendo las siguientes categorías:

- Servicios culturales: beneficios inmateriales que las personas obtienen de los ecosistemas a través del enriquecimiento espiritual, la recreación y las experiencias estéticas.
- Servicios de apoyo: aquellos necesarios para el funcionamiento de los ecosistemas.
- Servicios de aprovisionamiento: productos obtenidos de los ecosistemas.

Durante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) de 2009 se elaboró el nuevo concepto de SbN, asumido por UICN como eje central de su Programa Mundial, que fue definido como: 'acciones dirigidas a proteger, gestionar y restaurar de manera sostenible ecosistemas naturales o modificados, que hacen frente a retos de la sociedad de forma efectiva y adaptable, proporcionando simultáneamente bienestar humano y beneficios de la biodiversidad' (Fig. 1).



Figura 1.- Gráfico que ilustra las Soluciones basadas en la Naturaleza (UICN, 2017)

Las SbN están diseñadas para hacer frente a los grandes retos actuales de la sociedad, como son el cambio climático, la seguridad alimentaria y del agua, la salud humana, el riesgo de desastres y el desarrollo social y económico".

UICN (2017) para el desarrollo de las SbN desarrolló los siguientes principios preliminares:

- I. Las SbN deben adoptarse desde los principios de la Conservación de la naturaleza;
- II. Las SbN se pueden implementar de forma autónoma o integrada con otras soluciones a retos de la sociedad;
- III. Las SbN deben determinarse en los contextos naturales y culturales específicos de cada lugar, incluyendo los conocimientos tradicionales, locales y científicos;
- IV. Las SbN deben aportar beneficios sociales de un modo justo y equitativo que promueva la transparencia y una participación amplia;
- V. Las SbN deben mantener la diversidad biológica y cultural, así como garantizar la capacidad de los ecosistemas de evolucionar con el tiempo;
- VI. Las SbN se aplican en virtud de la escala de las unidades de paisaje;
- VII. Las SbN reconocen y abordan las compensaciones entre la obtención de beneficios económicos para el desarrollo inmediato, y las opciones futuras para la producción de la gama completa de servicios de los ecosistemas; y
- VIII. Las SbN forman parte integrante del diseño general de las políticas y medidas o acciones encaminadas a hacer frente a un reto concreto de la sociedad.

2. El Arco de Alborán: un hotspot de alta actividad antrópica

El Arco de Alborán (también conocido como Arco de Gibraltar) se trata del territorio continental comprendido desde el Estrecho de Gibraltar hasta la línea imaginaria entre el Cabo de Gata (Almería, España) y el Cabo Fegalo (Orán, Argelia). Dentro de este Arco la franja litoral, caracterizada por situarse en el piso bioclimático Termomediterráneo, ha sido identificada por el Centro de Cooperación para el Mediterráneo de UICN, como 'Espacio Alborán' (EA) (Geoportal Alborán, 2017) (Fig.2). Dicha distinción basada en la excepcional benignidad climática reconoce la complejidad de un mosaico de hábitats de muy alto interés a la par que una litoralización intensiva de la población, una artificialización territorial y una pluralidad de actividades económicas que inciden directamente en su calidad ambiental y motivo fundamental para ser considerado como un hotspot (Conservation International, 2017).

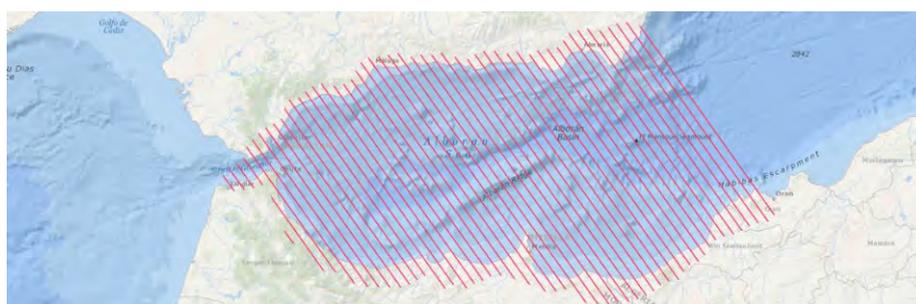


Figura 2.- Espacio Alborán en Geoportal Alborán (2017)

Tabla 1: Datos socioeconómicos básicos del EA

DATOS SOCIOECONÓMICOS BÁSICOS DEL ESPACIO ALBORÁN	
DATOS DEMOGRÁFICOS	ACTIVIDADES ECONÓMICAS
<p>POBLACIÓN CENSADA 6.734.887 habS POBLACIÓN ESTIMADA 8.755.353 habS equiv; DENSIDAD POBLACIONAL MEDIA 72,96 habS equiv/km² 9.621 habS equiv por km de litoral 106,9 hab equiv por km² sobre el Mar de Alborán</p>	<p>Actividades pesqueras Tráfico marítimo Actividades turísticas Actividades industriales Actividades mineras extractivas Espacios naturales protegidos Migración de especies marinas Migración de aves Desplazamiento de poblaciones humanas Desarrollo urbanístico intensivo y extensivo Grandes infraestructuras Cambio climático</p>

El principal problema ambiental que se cierne sobre este territorio es el aumento en el incremento del déficit hídrico como consecuencia de una reducción de la precipitaciones, un aumento de la evapotranspiración debido al aumento de temperaturas durante el periodo seco, y un consumo creciente debido al aumento poblacional, todo lo cual produce una celeridad hacia el colapso del sistema, debido a la aproximación urgente a la saturación de la capacidad de carga, lo que influye directamente en la fragmentación territorial y la calidad de los ecosistemas, y muy especialmente en los ecosistemas urbanos (Fig. 3 y 4).

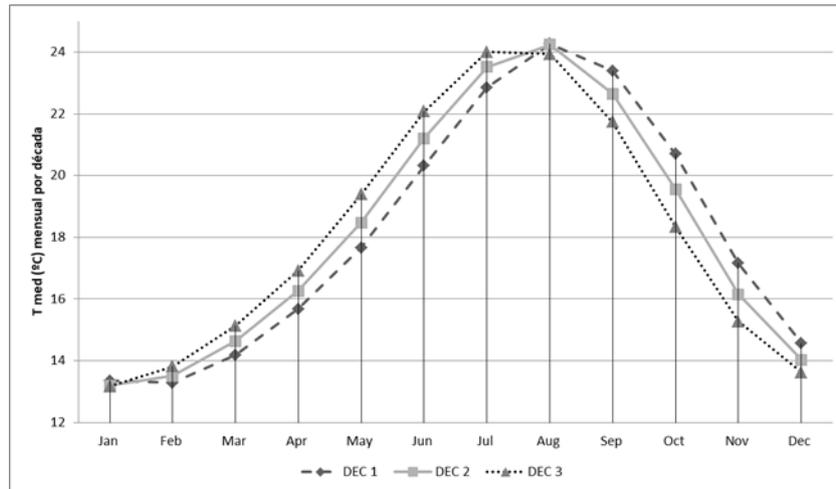


Figura 3.-Evolución de las temperaturas medias por meses en las tres últimas décadas estimadas con el software New Localclim 1.10 (FAO) considerando 10 estaciones del EA. Se observa en la última década un aumento de las temperaturas medias durante los ocho primeros meses del año y un descenso en los últimos cuatro.

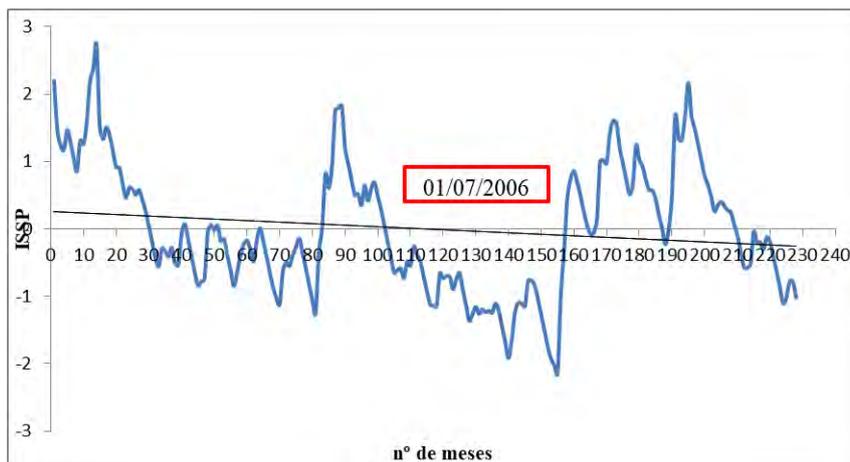


Figura 4.- Gráfico de la evolución del Índice de Severidad de Sequía de Palmer aplicado a varias cuencas del EA (Losada & Salvo, 2017). Se observa la tendencia negativa de los ciclo de sequía, marcando un nuevo ciclo que comenzó a principios de julio del 2006 (Losada & Salvo, 2017).

Esta escasez de recursos hídricos pone en riesgo una de las estructuras más importantes en la sostenibilidad del ecosistema urbano, las zonas verdes, generadoras de un importante número de SSEE de enorme valor para el confort de los asentamientos humanos, y muy especialmente en el marco territorial objeto de estudio.

3. El parque Comandante Cenítez (pcb): un espacio libre para el ensayo de N

El PCB es un espacio libre con una superficie de 30 ha, recientemente incorporado al patrimonio de la ciudad de Málaga. Este antiguo acuartelamiento militar, abandonado durante décadas, presenta una ubicación estratégica de centralidad en el contexto del Área Metropolitana de Málaga (Fig. 5). Inserto en un mallado de equipamientos e infraestructuras del transporte de alta intensidad (aeropuerto, ferrocarril, autovías, polígonos industriales y espacios macrocomerciales) es a la vez un importante nodo de un corredor ecológico que

conecta los ecosistemas litorales de la Desembocadura del Guadalhorce con la Sierra de Churriana y los agrosistemas de la Vega del Guadalhorce (Fig. 6).

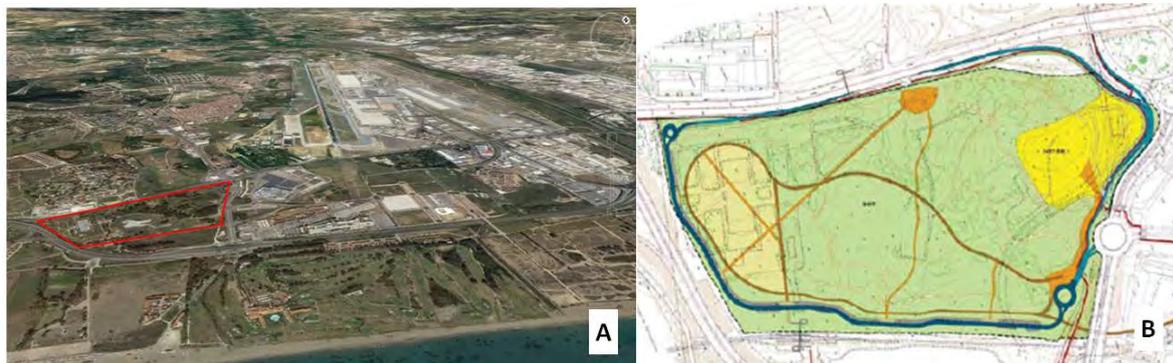


Figura 5.- El PCB en su contexto territorial (A) (imagen de base tomada de Google Earth, 29/03/2016).y zonificación ecológica actual (B) (tomada de PGOU)

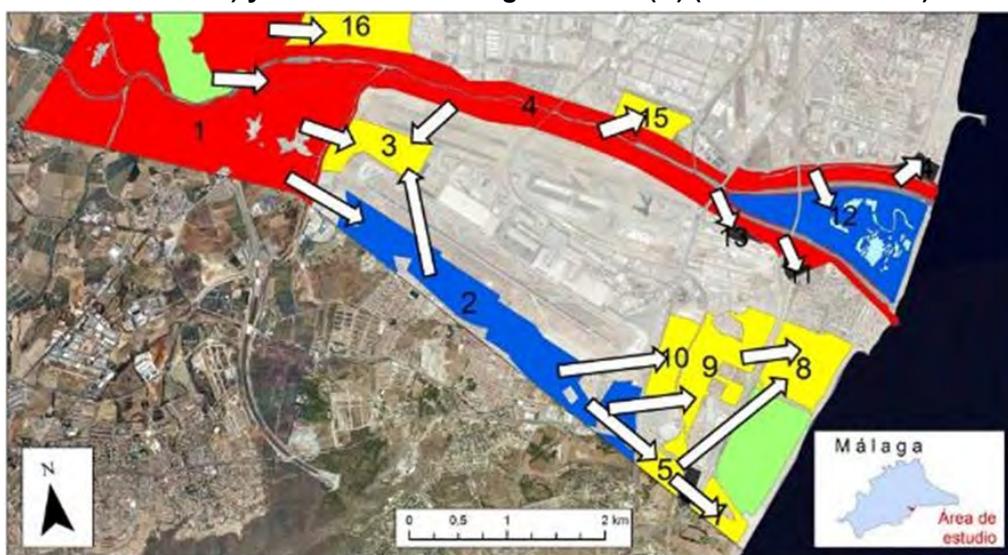


Figura 6.- El PCB (nodo 5) como nodo interconector del corredor ecológico de los ecosistemas del bajo Guadalhorce (Bernal & Salvo, 2017).

La actividad castrense, su posterior abandono y algunas técnicas de desbroce y mejoramiento llevadas a cabo en la última década han llevado a que este espacio esté desprovisto en buena medida de vegetación natural, constituyéndose así en un hábitat idóneo para la colonización de flora y fauna exótica, muchas de las veces con carácter invasor. En el caso de la flora de las 112 especies observadas un 20,5% han sido consideradas como EEI.

ESPECIES VEGETALES CITADAS DEL ÁMBITO DEL PCB NECESARIAS DE CONSIDERAR
(ordenadas según su hábito)

<i>Arbutus unedo</i>
<i>Clematis cirrhosa</i>
<i>Cneorum tricoxon</i>
<i>Coriaria myrtifolia</i>
<i>Daphne gnidium</i>
<i>Erica arborea</i>
<i>Stachyria alijum</i>
<i>Inularia helle</i>
<i>Juniperus phoenicea</i>
<i>Myrtus communis</i>
<i>Myrtus senegalensis</i>
<i>Nerium oleander</i>
<i>Phillyrea angustifolia</i>
<i>Pinus halepensis</i>
<i>Pinus pinaster</i>
<i>Pistacia lentiscus</i>
<i>Pistacia terebinthus</i>
<i>Retama monosperma</i>
<i>Retama sphaerocarpa</i>
<i>Rhamnus alaternus</i>
<i>Rhamnus officinalis</i>
<i>Tamarix africana</i>
<i>Viburnum tinus</i>
<i>Zaaphus lotus</i>

<i>Crithmum maritimum</i>
<i>Cytisus malacitamus</i>
<i>Genista umbellata</i>
<i>Ruscus aculeatus</i>
<i>Ruscus hypophyllum</i>
<i>Ruta chalepensis</i>
<i>Salvia lavandulifolia</i>
<i>Sideritis arborescens</i>
<i>Teline monspessulana</i>
<i>Thymra capitata</i>
<i>Armeria hirta</i>

<i>Limonium sinuatum</i>
<i>Nepeta tuberosa</i>
<i>Salvia argentea</i>
<i>Smyrnium perfoliatum</i>
<i>Stachys flavum</i>

<i>Muscari comosum</i>
<i>Orchis mascula</i>
<i>Orchis papilionacea</i>
<i>Pancreatum maritimum</i>
<i>Urginea maritima</i>
<i>Alyssum maritimum</i>
<i>Convolvulus humilis</i>
<i>Convolvulus meoanthus</i>
<i>Convolvulus siculus</i>



El PCB se trata de una porción del relleno sedimentario de carácter arenoso de la desembocadura del Río Guadalhorce. El perfil bioclimático de su ubicación corresponde a un bioclima mediterráneo pluviestacional oceánico correspondiente al piso bioclimático termomediterráneo inferior y con un ombrotipo seco inferior, que según la clasificación de Koeppen corresponde a un clima árido estepario cálido, con un período seco para la vegetación de más de seis meses y ocho meses en los que la evapotranspiración supera a las precipitaciones. En consecuencia, la vegetación potencial que correspondería a dicho territorio son las comunidades arbustivas (>2 m) que se desarrollan en los sistemas duranes en lo que predominan especies de los géneros *Retama*, *Pistacia*, *Phillyrea*, *Rhamnus*, *Arbutus* o *Myrtus* (HIC 5330).

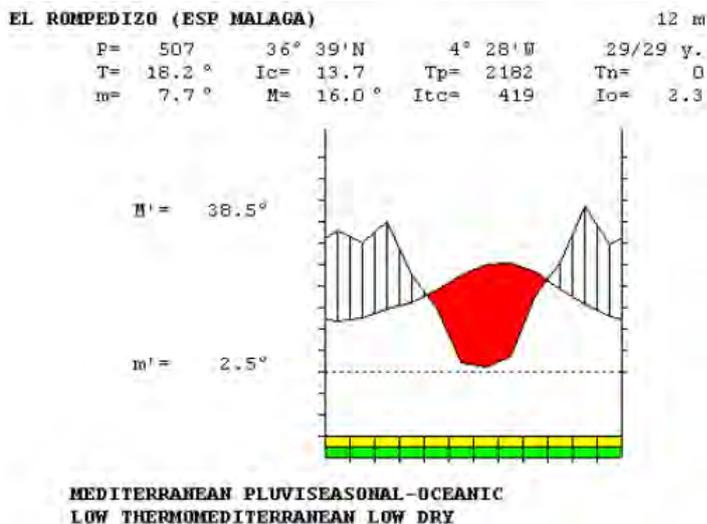


Figura 7.- Diagrama ombroclimático de El Rompedizo (Tomado de <http://www.globalbioclimatics.org/station/es-el-ro.htm>)

El PCB se valora en el PGOU de Málaga como un espacio libre de alto potencial ambiental y de esparcimiento para el conjunto de la ciudad, considerándolo como Zona de Espacio Libre de Equipamiento. El desarrollo futuro de este Parque debe cumplir las 21 determinaciones de

carácter general de los Sistema Generales de Espacios libres, así como 6 de carácter particular (Tabla 2)

**Tabla 2: Determinaciones específicas del SGIT-BM.1 del PGOU de Málaga
(Plan Especial de 2017)**

1. La situación de la red peatonal, basada en el cruce de un vial general peatonal que atraviesa el espacio libre, formando parte de un circuito de “running” que lo rodea, con distintos ejes de caminos que unen las distintas puertas del mismo, desde la entrada histórica al acuartelamiento.
2. La realización de un espacio natural tipo pinar mediterráneo, con vegetación autóctona, en el conjunto de los terrenos. Las rasantes del mismo podrán estudiarse dando cierto movimiento a las mismas.
3. Se procurara también mantener las masas de pinos existentes, completándolas con nuevas plantaciones.
4. La ejecución de espacios museísticos y exposiciones temporales o fijas al aire libre en 65.000 m ² de superficie.
5. La realización, en alguna de las fases de su ejecución, de pistas deportivas en la zona sur, anteriormente ocupada por los barracones del cuartel, integradas en el parque.
6. Se deberá poner en valor, en algún momento, rehabilitándola, la puerta principal de acuartelamiento que la ficha del PGOU protege.

En este sentido el requerimiento básico para cumplir las determinaciones 2 y 3, considerando las condiciones ambientales para este extenso espacio, hacen necesario y obligado acudir a SbNs. Indiscutiblemente el principal factor limitante para el desarrollo del PCB es el hídrico, y en consecuencia el diseño de nuevas plantaciones bajo la perspectiva de recrear la vegetación natural debe ser el principal reto.

4. Experiencias previas: el Jardín Nazarí como prototipo de SbN

Los jardines en climas mediterráneos, en ubicaciones con un extenso periodo seco y con altas temperaturas, presentan un consumo hídrico aproximado 1,6-5,1 l/m², variando desde los 1,5 m³/día en los árboles autóctonos hasta los 4 m³/día en las praderas de césped. Este rango también varía con el formato del diseño, y así a través de la conformación de rocallas y en la xerojardinería se puede ahorrar hasta un 40% en la provisión hídrica. Así mismo, mientras que en un espacio abierto artificializado, con zonas de sombra y descanso, el consumo mínimo en Agosto es de 235l/m², en un jardín arbolado se reduce este consumo hasta 50 l/m². La traducción de estos datos a extensas áreas verdes conduce inexorablemente a concluir la insostenibilidad de su mantenimiento, a menos que se adopten SbN que supongan una búsqueda de equilibrio.

El Jardín Mediterráneo es un tipo de zona verde que tiene como principal condicionante las características climáticas del territorio, y en concreto el extenso período seco que en algunos casos puede dilatarse por un período de más de nueve meses. A esto debe sumarse la escasez de recursos hídricos que hay actualmente para la población. Estos condicionantes hacen que cada vez sea más difícil mantener zonas verdes, que a su vez son necesarias para paliar los efectos del cambio climático, por ello el Jardín Mediterráneo tradicional constituye el paradigma a seguir.

El jardín clásico mediterráneo andaluz tiene su origen en el conocido como jardín en altura o jardín nazarí, una estructura cerrada marcada por los juegos de agua, favorecedores, junto

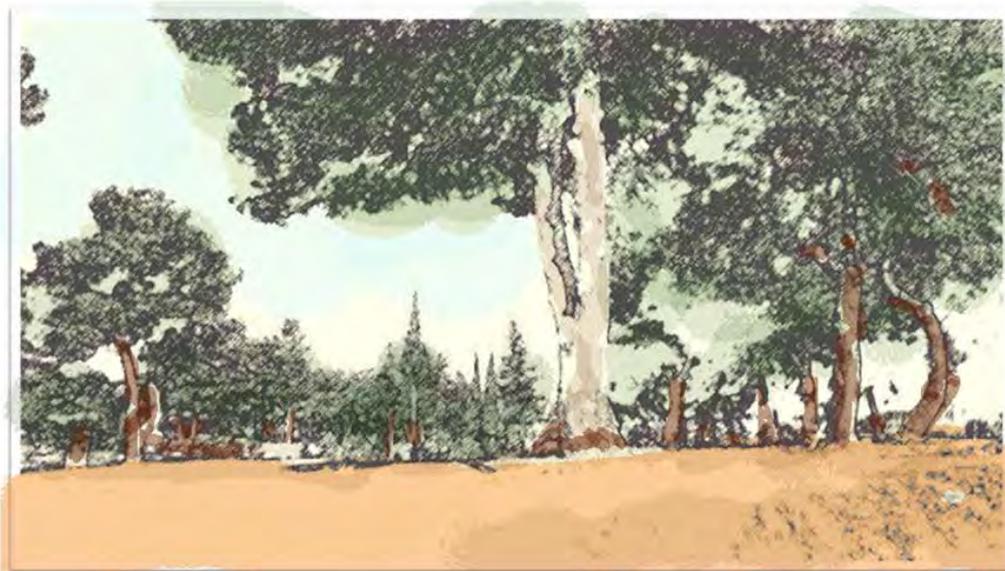
con la umbría, del frescor que dotaba al lugar de un alto confort ambiental, así como de una variada flora para el disfrute de los cinco sentidos (Tabla 3). Estos jardines, heredados de la cultura andalusí, son sobre todo el resultado de una equilibrada gestión del recurso hídrico. El jardín mediterráneo actual, concebido en todos los territorios del planeta con dicho clima y con una problemática similar (Australia, California, Sudáfrica, Chile) es una estructura dominada por en su diseño por la economía del recurso hídrico (Fig. 5).

Tabla 3.- Especies vegetales recomendadas según su porte y características en los jardines mediterráneos

BIOTIPOS	ESPECIES RECOMENDADAS
Árboles mediterráneos que generen sombra	pinos, encinas, alcornoques, chopos.
Árboles frutales mediterráneos que aporten color y olor	naranja, olivo, granado, madroño
Arbustos mediterráneos para complementar a los árboles	laurel, durillo, arrayán.
Espacios de rocalla con arena y piedra con plantas aromáticas	romero, tomillo, lavanda.
Plantas de colores intensos	adelfas, retamas, azucenas.

ÁRBOLES RECOMENDADOS POR SUS BENEFICIOS AMBIENTALES PARA UN BIOCLIMA COMO EL DEL PCB

<i>Ceratonia siliqua</i> (Algarrobo)	<i>Phoenix dactylifera</i> (Palmera datilera)	<i>Tipuana tipu</i> (Tipuana)
<i>Cercis siliquastrum</i> (Árbol del amor)	<i>Pinus pinea</i> (Pino piñonero)	<i>Bougainvillea glabra</i> (Buganvilla)
<i>Lagunaria petersonii</i> (Pica pica)	<i>Pinus pinaster</i> (Pino marítimo)	<i>Chamaerops humilis</i> (Palmito)
<i>Melia azederach</i> (Melia)	<i>Populus nigra</i> (Chopo)	<i>Lantana strigocamara</i> (Banderita española)
<i>Morus alba</i> (Morera)	<i>Quercus faginea</i> (Quejigo)	<i>Ligustrum ovalifolium</i> (Aligustre)
<i>Olea europea</i> var. <i>sylvestris</i> (Acebuche)	<i>Schinus molle</i> (Falso pimentero)	





Figuroa-Clemente, E. (2008). Evaluación de la capacidad de sumidero de CO₂ de la vegetación arbórea y arbustiva susceptible de ser utilizada en la red de carreteras de Andalucía. Generación de un modelo regional de funcionamiento de sumideros y aplicación práctica.

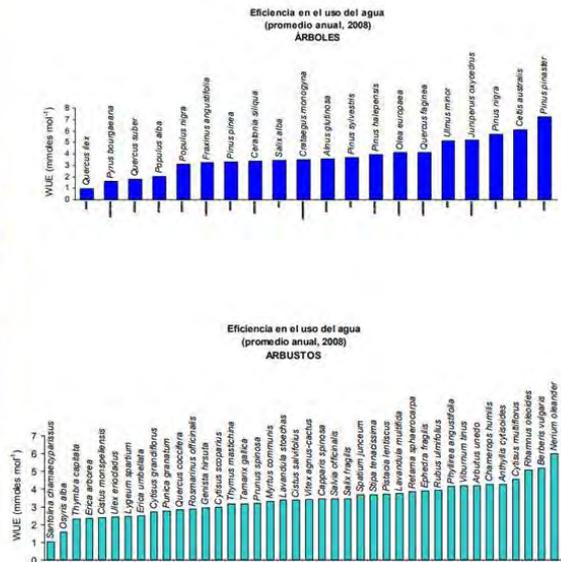


Figura 8.- Eficiencia en el uso de agua (Figuroa-Clemente;E,2008)

5. Modelo experimental: islas de biodiversidad alboránica

Los arriates frontales de la Facultad de Ciencias de la UMA constituyen por su morfología, estructura y biodiversidad un paradigma de Jardín Mediterráneo (Fig. 6 y 7).

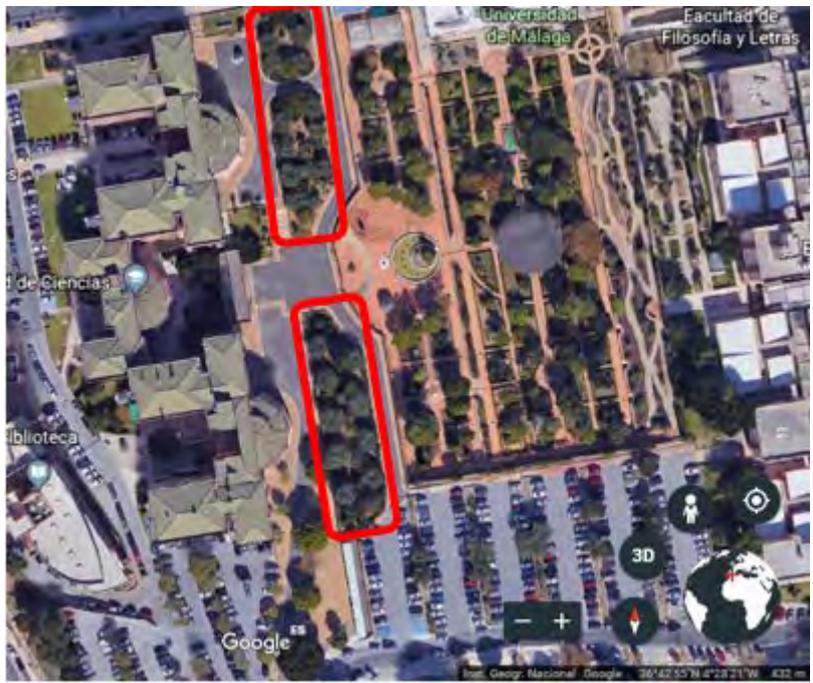


Figura 9.- Arriates frontales de la Facultad de Ciencias de la UMA en el Boulevard Louis Pasteur (delimitación sobre imagen de Google Earth)



Figura 10.- Detalle de la conformación de los arriates.

En la Tabla 4 se recogen las especies de estos arriates y las principales características.

Tabla 4: Especies que componen el parterre y características (Elaboración propia)

	Nombre científico	Nombre común	Tasa de crecimiento(cm/año)	Capacidad de sombreado en hoja	Longevidad (años)
1	<i>Rosmarinus officinalis</i>	Romero	15,24	Densa	30-100
2	<i>Myrtus communis</i>	Mirto	60,96	Densa	50-150
3	<i>Ceratonia siliqua</i>	Algarrobo	60,96	Muy densa	>150
4	<i>Arbutus unedo</i>	Madroño	30,48-60,96	Densa	50-150
5	<i>Olea europaea</i>	Olivo	60,96	Moderadamente densa	>150
6	<i>Nerium oleander</i>	Adelfa	60,96-88,9	Densa	50-150
7	<i>Viburnum tinus</i>	Durillo	60,96	De moderada a densa	50-150
8	<i>Laurus nobilis</i>	Laurel	30,48-60,96	De densa a muy densa	50-150
9	<i>Buxus sempervirens</i>	Boj	60,96	Muy densa	<50
10	<i>Cercis siliquastrum</i>	Árbol del amor	60,96	Moderada	50-150
11	<i>Quercus ilex</i>	Encina	60,96	Densa	>150
12	<i>Punica granatum</i>	Granado	60,96	De moderada a densa	50-150
13	<i>Viburnum tinus</i>	Durillo	60,96	De moderada a densa	50-150
14	<i>Pinus halepensis</i>	Pino carrasco	60,96-91,44	Moderadamente densa	>150
15	<i>Chamaerops humilis</i>	Palmito	30,48	Moderadamente densa	>150

En atención a la eficiencia en el consumo de agua y de mantenimiento, así como por la alta productividad de los servicios ecosistémicos de estos arriates, se propone el siguiente modelo de unidades de intervención a las que se denominan: Islas de Biodiversidad Alboránica (Fig. 8).

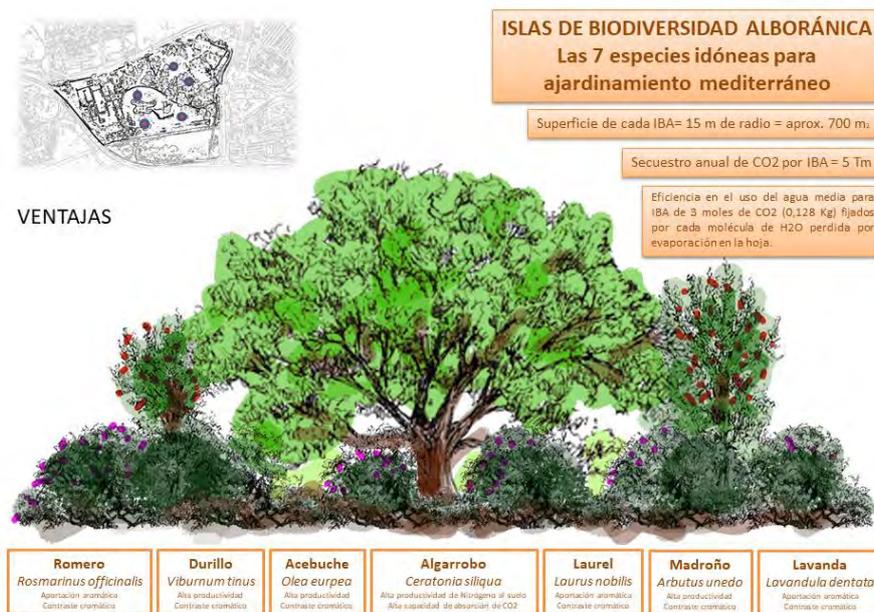


Figura 11. Esquema de las Islas de Biodiversidad Alboránica.

1. MODELO DE IMPLANTACIÓN DE ISLAS DE BIODIVERSIDAD ALBORÁNICA EN EL PCB

Tras los trabajos de campo realizados en el PCB en los que se analizaron las características edáficas, de relieve y de flora y vegetación, se sectorizó el territorio en las siguientes unidades ambientales (Fig.12):



Figura 12.- Unidades ambientales definidas en el PCB (Google maps)

- 1- Pinar denso.- Unidad caracterizada por un suelo rico en mantillo proporcionado por la descomposición de la pinocha, así como por una mayor humedad proporcionada por el denso dosel de las copas de los árboles (Fig. 13).



Un pinar absorbe alrededor de 28 toneladas de CO₂ por hectárea y año.
El PCB dispone de una masa arbolada formada fundamentalmente por un pinar de 6,6 hectáreas, lo que supone una capacidad de absorción de CO₂ de
185 T/año

Figura 13.- Unidad de Pinar denso y cálculo de la capacidad de absorción anual de CO₂

- 2- Vegetación higrófila con abundancia de caña brava.- Se trata de una zona de vaguada en donde es perceptible la existencia de una elevada humedad edáfica debido a la proximidad del acuífero a la superficie. Solo quedan evidencias de la vegetación natural (juncales) que ha sido desplazada por la caña, especie exótica invasora de alta capacidad colonizadora, así como por antiguos eucaliptos que debieron ser plantados para la desecación de los lagunajos que se formarían (Fig.14).



Figura 14.- Unidad de Vegetación higrófila.

- 3- Pinar despejado con ailantos.- Unidad colindante con la anterior, que por su mayor pendiente presenta una mayor aridez, estando ocupada por un pinar menos denso, observándose como progresa la extensión del ailanto o árbol del cielo desde la parte más cercana a la autovía (Fig. 15).



Figura 15.- Unidad de Pinar despejado

- 4- Adelfar con jacarandás.- La topografía en este sector propicia una humedad edáfica elevada que conlleva a la aparición de especies edafohigrófilas como atestigua la presencia de la adelfa. Esta característica propiciaron en su momento la aparecen especies como la adelfa, jacarandá, pinos y varias agrupaciones de ailanto (Fig. 16).



Figura 16.- Unidad de adelfar con jacarandás

- 5- Plantación de eucaliptos acompañada de especies de interés como el palmito (Fig. 17).



Figura 17.- Unidad de Plantación de eucaliptos.

- 6- Unidad de alta antropización.- La presencia de una amplia plancha de cemento confieren al lugar un alto grado de degradación. En cualquier caso cabe destacar la presencia de varios ejemplares interesantes de olmos, cipreses y yucas (Fig. 18).



Figura 18.- Unidad de elevada antropización.

- 7- Cultivo abandonado.-Zona bastante húmeda con gran cantidad de materia orgánica en el suelo, parece corresponder a un antiguo huerto, por los rastros de surcos en la tierra.



Figura 19.- Unidad de Cultivo abandonado

- 8- Paseo de eucaliptos.- Esta es la zona más baja con respecto al nivel del mar, cercana a la línea de ferrocarril. En ella aparece un paseo de eucaliptos con interés paisajístico (Fig. 20).



Figura 20.- Unidad Paseo de eucaliptos

- 9- Alrededores de la balsa.- La unidad que comprende la balsa y alrededores es la más árida y la menos poblada de especies vegetales, principalmente aparecen especies invasoras y nitrófilas.



Figura 21.- Unidad de Alrededores de la balsa

Con la finalidad de establecer las unidades prioritarias de intervención, en las que implantar los arriates modelos, se consideró los siguientes criterios de oportunidad:

1. Servir de centros de dispersión de la flora y vegetación natural.
2. Capacidad de competitividad frente a las EEI.
3. Máxima economía del recurso hídrico.
4. Contención de relieve

5. Aumento de la calidad paisajística

Siguiendo estos criterios se determinaron hasta 9 puntos para la implantación de Islas de Biodiversidad alboránica, que cumplan las funciones de eficiencia hídrica y alta productividad de servicios ecosistémicos.

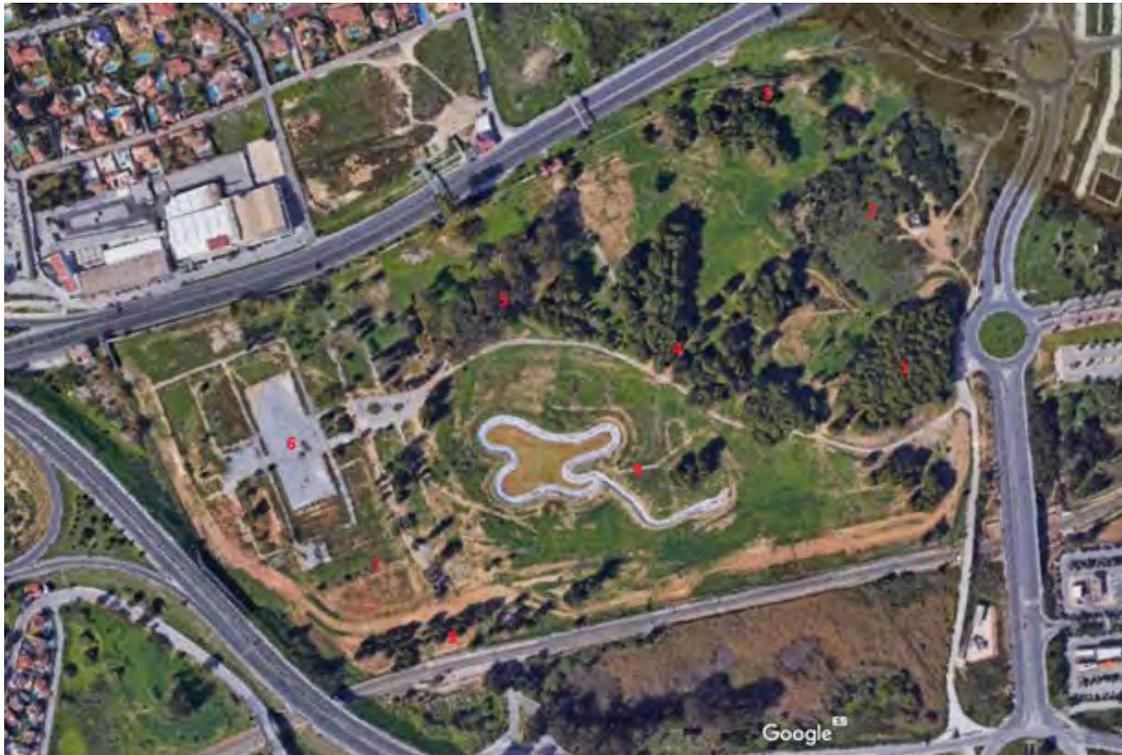


Figura 22. Puntos de implantación de Islas de Biodiversidad alboránica en el PCB

CONCLUSIONES

- Las Soluciones basadas en la Naturaleza son un concepto que abarca todas las acciones que se apoyan en los ecosistemas y en los servicios que estos proveen para de forma efectiva y adaptable se enfrente a retos actuales, proporcionando simultáneamente bienestar humano y beneficios de la biodiversidad. Bajo dicha premisa se ha realizado un análisis de las principales incidencias sobre el marco territorial de Espacio de Alborán, evidenciándose que una de las principales preocupaciones es el mantenimiento de las zonas verdes urbanas como sustento fisiológico del ecosistema urbano y en consecuencia de su sostenibilidad.
- Se ha realizado un análisis historiográfico de las formas de actuación jardinísticas de las diferentes culturas del ámbito del arco de Alborán ante fenómenos de sequía prolongada, entendiéndose que de las experiencias realizadas se han obtenido consecuencias posteriores. En este sentido el conocido como 'Jardín Nazarí' es un buen ejemplo de los requisitos que requieren hoy nuestras zonas verdes. El análisis de un modelo diseñado con tales criterios (parterres delanteros de la Facultad de Ciencias – UMA) han ofrecido unos resultados dignos de ser reiterados.
- Se proponen como tipología de xerojardinería adaptable a las condiciones del cambio global en este territorio las Islas de Biodiversidad Alboránica (IBA), que contribuyen al

aumento de la biodiversidad, sirven de centros de dispersión vegetal, frenan la expansión de EEI, estabilizan el relieve, aumentan la calidad paisajística y su mantenimiento es mínimo.

- Para su implantación experimental de las IBAs se ha considerado la oportunidad de llevarlas a cabo en un espacio de nuevo diseño como es el Parque Comandante Benítez, nodo de especial interés en el corredor ecológico que une la Desembocadura del Guadalhorce y las zonas interiores de Vega. Se han estimado que en las 30 has, y considerando las distintas unidades ecosistémicas, la plantación de 9 IBAs ubicadas estratégicamente para la naturación del mismo.

Bibliografía

Bernal Arlandi, A. & Salvo Tierra, Á.E. (2017) Ordenación territorial sostenible mediante criterios objetivables basados en análisis del paisaje y técnicas geomáticas: El caso del ámbito de la desembocadura del Guadalhorce. (*ined.*).

Conservation International (2017) <https://www.conservation.org/how/pages/hotspots.aspx>

Figueroa-Clemente, E. (2008). Evaluación de la capacidad de sumidero de CO₂ de la vegetación arbórea y arbustiva susceptible de ser utilizada en la red de carreteras de Andalucía. Generación de un modelo estacional de funcionamiento de sumideros y aplicación práctica.

Geoportal Alborán (2017) Centro de Cooperación del Mediterráneo. <http://www.iucn-geoportalboran.org/es/>

Google Earth. <https://earth.google.com/web/>

Google maps. <https://www.google.es/maps>

http://www.formajardin.es/2012/04/las-necesidades-de-agua-de-riego-en-los_25.html

Instituto Forestal de Ecosistemas Urbanos <http://ufei.calpoly.edu/>

Losada, N. & Salvo Tierra, Á.E. (2017) Teledetección como herramienta para determinar cambios en la morfología de masas de aguas continentales. (*ined.*).

Montes, C., & Sala, O. (2007). La Evaluación de los Ecosistemas del Milenio. Las relaciones entre el funcionamiento de los ecosistemas y el bienestar humano. Revista Ecosistemas, 16(3).

UICN (2017) Programa de la UICN 2017-2020 (aprobado por el Congreso Mundial de la Naturaleza septiembre de 2016).

Balvanera, P., & Cotler, H. (2007). Acercamientos al estudio de los servicios ecosistémicos. Gaceta ecológica, (84-85).

Correspondencia (Para más información contacte con):

Nombre y Apellido: Andrés Alcántara Valero

Teléfono: + 952 02 84 49

Fax: + 952 02 84 30

E-mail: andres.alcantara@iucn.org

Cesión de derechos

Por la presente, y como autor del trabajo mencionado arriba, cedo al Palacio de Ferias y Congresos de Málaga una licencia no-exclusiva irrevocable para imprimir, reproducir,

distribuir, transmitir o comunicar de cualquier manera dicho trabajo, incluyendo el derecho de hacer modificaciones de formato. Además, afirmo que esta cesión no lesiona los derechos de terceros.



Francisco Fernández Hernández
José Miguel Peña Suárez
María del Carmen González Muriano
Corporación Empresarial Altra S.L.

ALGORITMO DE CONTROL DE ELEMENTOS DE SOMBRAS Y CLIMATIZACIÓN ZONIFICADA EN EL SECTOR RESIDENCIAL

Resumen

El presente estudio propone un algoritmo de control que integra el funcionamiento de persianas en una vivienda, con la regulación de la iluminación y el sistema de control inteligente en climatización de Airzone. El estudio se realiza para una vivienda unifamiliar tipo de referencia, con 5 zonas térmicas, situada en la localidad de Málaga. El control se hace sobre dos persianas del salón, situadas en orientaciones oeste y sur. Se contemplan 4 posiciones de control de la persiana (p1: arriba, p30: bajada al 30%, p60: bajada al 60% y p4: bajada). En total existen 16 combinaciones de posición de las persianas en las dos ventanas propuestas que el algoritmo evalúa en cada paso de tiempo y da como salida las posiciones que obtengan mejor resultado de iluminancia interior y ahorro de energía. La climatización se atiende con un sistema de expansión directa combinado con un suelo radiante. El algoritmo de control se diseña en base a las simulaciones de iluminación natural realizadas con Daysim y las simulaciones térmicas realizadas con Trnsys. El objetivo del artículo es demostrar que, con un sistema de control adecuado, se consiguen ahorros de energía y el confort térmico y visual de los usuarios del edificio.

Abstract

This paper proposes a control algorithm which coordinates the performance of blinds, lighting and the Airzone HVAC integrated zoning system. The case of study is a single family, with five thermal zones, placed in Málaga. Two blinds, with south and west orientation in the same zone, are controlled. Four positions of the blinds are considered (p1: up, p30: 30% low, p60: 60% low and p4: entirely low). The algorithm evaluates 16 combinations of the position of the blinds, with the two windows proposed, and, in every time-step, gives the position with better illuminance in the zone and lower energy consumption. The HVAC system is an inverter air conditioning unit combined with a radiant floor system. The control algorithm is designed based on the results of the daylighting and thermal carried out with Daysim and Trnsys, respectively. The aim of the paper is show that, with the appropriate control system, we can obtain energy savings and building users thermal and visual comfort.

Palabras clave: *iluminación natural, climatización zonificada, algoritmo de control, ahorro de energía, confort visual.*

Área temática: *Actuaciones sostenibles en la edificación.*

1. Introducción

En los edificios en general, los efectos de la luz natural en el confort, salud, bienestar y productividad son muy beneficiosos para las personas (Heschong, 2007). En los últimos años, para aprovechar estas ventajas, existe una tendencia en los nuevos edificios de aumentar el porcentaje de superficie acristalada en las fachadas. Sin embargo, en climas con un gran número de horas de sol al año y veranos cálidos, la radiación solar incidente tiene importantes implicaciones: el incremento de las cargas de refrigeración en verano y la probabilidad de deslumbramiento.

La regulación de la entrada de luz natural en el edificio se realiza mediante elementos de sombra: persianas, lamas, toldos, etc. Un usuario puede bajar una persiana si el sol le provoca desconfort térmico ó deslumbramiento, pero debe tener la luz artificial encendida para alcanzar una iluminación adecuada. El equilibrio entre el confort visual y térmico, así como conseguir la máxima eficiencia energética en el edificio reduciendo el consumo en iluminación y climatización, se puede lograr a través de un sistema de control inteligente que coordine los diferentes elementos involucrados. Existe una amplia literatura relativa a este tema. El uso de elementos de sombra, como voladizos o lamas exteriores, puede disminuir la carga solar en un 80% (ASHRAE, 1997). El control coordinado de la luz natural mediante elementos de sombra con la iluminación artificial permite disminuir el consumo de electricidad debido a iluminación desde un 30 a un 70% (Yang&Nam, 2010). Por otra parte, el sistema de control por zonificación de Airzone en un sistema inverter presenta ahorros de consumo de energía entre el 17 y 32% frente a uno no zonificado (GEUMA, 2011).

El presente estudio demuestra cómo un algoritmo de control que integra el funcionamiento de persianas en una vivienda, con la regulación de la iluminación, y un sistema de control inteligente en climatización de Airzone consigue un importante ahorro en el consumo de energía y asegura el confort térmico y visual de los usuarios del edificio.

2. Objetivos y metodología

El objetivo del estudio es el diseño de un algoritmo de control de unas persianas en una vivienda, integrado con la regulación de la iluminación, y un sistema de control inteligente en climatización de Airzone. La metodología es la siguiente: se presenta el algoritmo de control de persianas y las especificaciones de control del sistema de climatización. Posteriormente, se describe el caso de estudio y se exponen los resultados relacionados con el confort visual, consumo de energía y funcionamiento del sistema en días típicos de verano.

El trabajo se ha abordado mediante la simulación con Daysim para la iluminación natural y TRNSYS 17 para el estudio térmico. El esquema de principio de la instalación simulada se representa en la Figura 1.

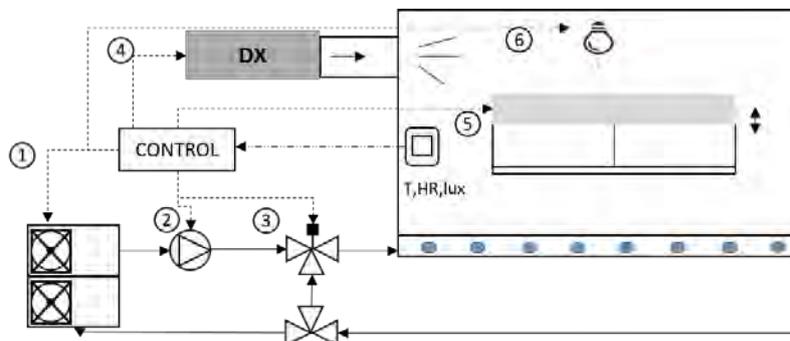


Figura 1. Esquema de principio de la instalación objeto de estudio.

El sistema de control modelado integra diferentes elementos (figura 1). El sistema de climatización consiste en una integración de suelo radiante y un sistema de expansión directa (DX). El funcionamiento de ambos sistemas está coordinado por la lógica de control de Airzone, que mediante el modo combinado de control, garantiza el confort en la zona y el óptimo consumo de energía de ambos emisores. El control se basa en una comunicación bidireccional entre el sistema de zonas y el equipo de climatización a través de la pasarela de integración. La central de control recibe del termostato de cada zona información sobre la temperatura, humedad relativa e iluminancia de la zona y se encarga de controlar los diferentes elementos: la temperatura de producción del agua fría o caliente de la bomba de calor (1), la bomba de recirculación (2), la válvula de tres vías de entrada al suelo radiante (3), la velocidad del ventilador y la temperatura de consigna de la máquina de expansión directa (4), la posición de las persianas (5) y la iluminación artificial (6).

3. Modelado del algoritmo de control de persianas.

El algoritmo de control de persianas se diseña tomando como referencia los resultados de las simulaciones de iluminación natural del caso de estudio propuesto (apartado 4). El objetivo del algoritmo es establecer un funcionamiento de las persianas que consiga priorizar el confort visual (modo iluminación) o el confort térmico (modo climatización), en función de los requisitos del usuario.

Se presentan 16 casos en los que se reflejan todas las posibles combinaciones de: persiana subida totalmente (p1), al 30% (p30), al 60% (p60) y bajada (p4), en cada una de las ventanas. En la figura 2 se muestran los 16 casos de manera que la primera posición corresponde a la ventana sur y la segunda a la oeste. Por ejemplo, si la oeste está al 30% (p30) y la sur subida totalmente (p1), el caso sería el p1p30.

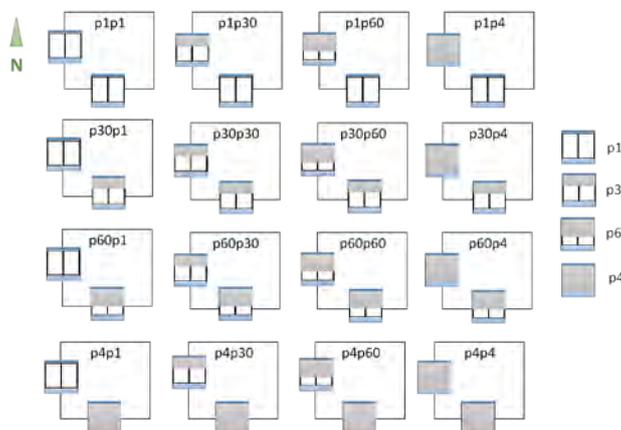


Figura 2. Casos de simulación de las persianas.

Los parámetros del modelo, entradas y salidas son los que se muestran en la figura 3. Los valores de iluminancia de los 16 casos se obtienen de las simulaciones de Daysim. Este modelo se integra en Trnsys para el estudio térmico.



Figura 3. Parámetros, entradas y salidas del modelo de control de persianas.

Para la coordinación de las dos persianas es importante considerar la orientación de las ventanas y la posición del sol a lo largo del día. En la figura 4 se muestra el ejemplo de funcionamiento del algoritmo de control para tres instantes del día: mañana, mediodía y tarde. Por la mañana el sol incide principalmente en la fachada este (figura 4, caso 1), por lo que las persianas de las ventanas sur y oeste permanecen subidas para garantizar la entrada de luz natural sin perjudicar el clima. A medida que avanza la mañana, el sol se va desplazando hacia la fachada sur y el control mantiene la persiana de la ventana oeste totalmente subida favoreciendo la entrada de luz natural (figura 4, caso 2) mientras que regula la persiana de la ventana sur para evitar un aumento indeseado de la temperatura de la zona o iluminación excesiva. A partir de cierta hora de la tarde, la radiación solar penetra tanto por la ventana sur como por la ventana oeste (figura 4, caso 3). En esta situación se propone una simplificación que consiste en considerar que ambas persianas se muevan a la vez. Finalmente, por la tarde, llegará un instante en el que la radiación solar incide sólo en la ventana oeste (figura 4, caso 4). En este caso, se comienza a controlar la persiana de la ventana oeste para regular la entrada de la radiación solar directa, y se deja la persiana de la fachada sur totalmente subida para favorecer la entrada de la luz natural.

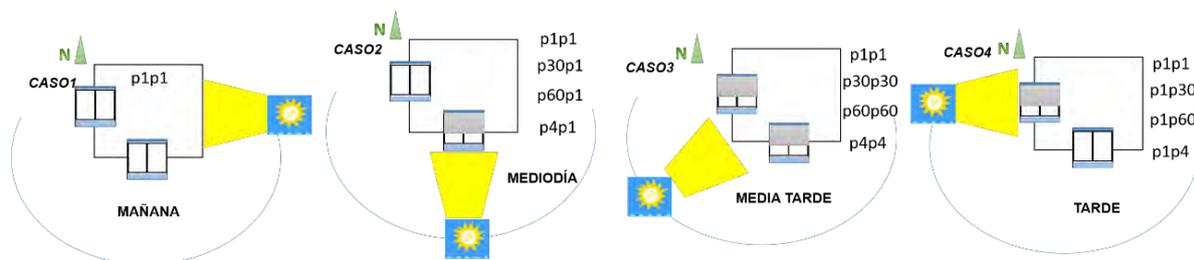


Figura 4. Funcionamiento del algoritmo de control de persianas.

Las premisas de control se fundamentan en comprobar el nivel de confort visual y térmico en la zona y, en consecuencia, ordenar una acción de control sobre la persiana determinada. Son las siguientes:

- ILUM OK: La iluminancia de la zona es mayor que la consigna de iluminación determinada y menor que la máxima fijada para una iluminancia excesiva.
- OSC: La iluminancia de la zona es menor que la consigna de iluminación.
- DESL: La iluminancia de la zona es mayor que el límite máximo fijado.
- CONF: La temperatura de la zona está en los límites de confort térmicos establecidos.

- DISC: La temperatura de la zona no está en los límites de confort térmicos establecidos.

Se muestra la tabla correspondiente al periodo de mediodía (tabla 1), para el modo de calefacción y refrigeración. En ella se plantea los posibles casos de operación de las persianas y, en función de las premisas de control y del modo prioritario del usuario (iluminación o climatización), se observa si, en ese caso, las persianas se quedan como están (=), suben (↑) o bajan (↓).

Tabla 1: Algoritmo de control para la etapa de mediodía (rojo calefacción, azul refrigeración).

MEDIODÍA	ILUM OK + CONF		ILUM OK + DISCONF		OSC + CONF		OSC + DISCONF		DESL + CONF		DESL + DISC	
p1p1	=	=	=	ILUM = CLIMA ↓	=	=	=	↓	ILUM ↓ CLIMA =	↓	↓	↓
p30p1	=	=	↑	ILUM = CLIMA ↓	↑	ILUM ↑ CLIMA =	↑	ILUM ↑ CLIMA ↓	ILUM ↓ CLIMA =	↓	↓	↓
p60p1	=	=	ILUM = CLIMA ↑	ILUM = CLIMA ↓	↑	ILUM ↑ CLIMA =	↑	ILUM ↑ CLIMA ↓	ILUM ↓ CLIMA =	↓	↓	↓
p4p1	=	=	↑	=	↑	ILUM ↑ CLIMA =	↑	ILUM ↑ CLIMA =	-	-	-	-

4. Caso de estudio. Resultados.

4.1. Descripción del edificio y los sistemas.

El edificio de estudio es una vivienda unifamiliar situada en la planta intermedia de un bloque de edificios (figura 5), situada en la localidad de Málaga, con una latitud y longitud de (36.76°, -4.39°). Desde el punto de vista lumínico, se va a estudiar solamente el salón, por ser la zona que más tiempo ocupan los habitantes a lo largo del día y cuyos resultados pueden ser extrapolables al resto de estancias.

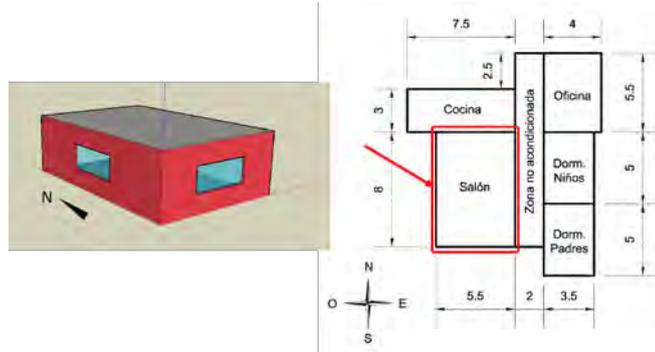


Figura 5. Esquema general de la vivienda.

Las dimensiones del salón son 5.5x8 m² y 2.5 m de altura. Dos de sus paredes dan al exterior: la fachada sur y la fachada oeste, mientras que la norte y la oeste dan a la cocina y el pasillo, respectivamente. Ambas fachadas exteriores tienen ventanas de 2.40x1 m², lo que supone una superficie acristalada de 17.5% en la fachada sur y 12% en la oeste. Ambas

ventanas son de doble cristal 4-16-4 mm, con una transmitancia visual de 72% y transmisividad térmica de 78%.

Se define un plano de trabajo con una altura de 0.85 m, para el que se establece el nivel de iluminación requerido de 500 lux en la zona según la UNE-12464.1. En el plano de trabajo se define una malla de sensores separados, a una distancia de 0.8 m, lo que constituye una malla de un total de 72 sensores. Por último, el nivel de iluminación se ha supuesto constante a 5 W/m², con un control que depende de la iluminancia en el plano de trabajo.

En relación al sistema de climatización, se han dimensionado los equipos en función a las cargas térmicas simultáneas de la vivienda, que tiene en cuenta la zonificación de las zonas. La bomba de calor para el suelo radiante es de la familia Daikin Altherma, modelo ERLQ-006-CV3 con una capacidad nominal de calefacción y refrigeración de 6 y 6.76 kW, respectivamente. El equipo de expansión directa es de Daikin, modelo FBQ35D, de capacidad nominal de calefacción y refrigeración de 4 y 3.4 kW, respectivamente. El suelo radiante se dimensiona con un paso entre tubos de 20 cm, caudal nominal de agua de 5 l/hm², temperaturas de consigna de entrada de agua de 35 y 18°C para calefacción y refrigeración, respectivamente.

4.2. Resultados

A continuación, se muestran los siguientes resultados de las simulaciones:

Día característico de verano. Iluminancia interior y modo de operación.

La figura 6 muestra la evolución de la iluminancia media del salón y las posiciones de las persianas para el día 27 de julio. Se comparan el modo de iluminación y el modo climatización para analizar el comportamiento del sistema en los dos modos.

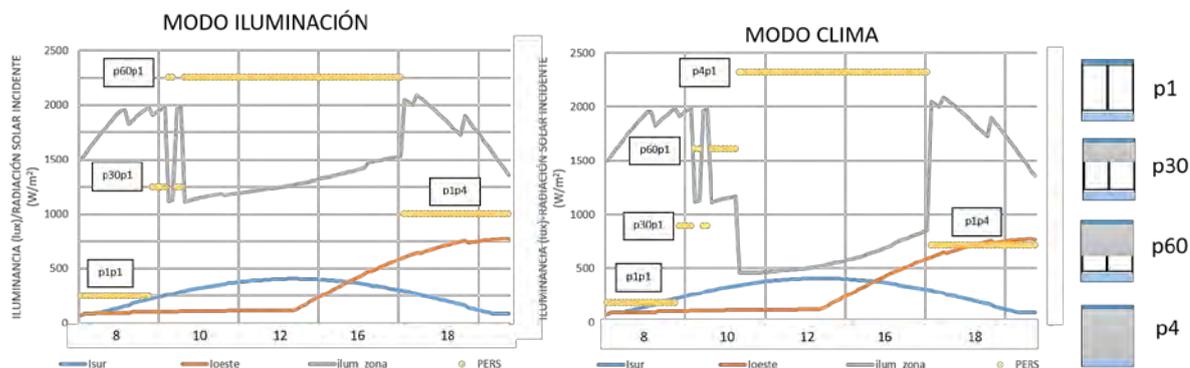


Figura 6. Evolución de la iluminancia media en la zona, en un día de verano.

En ambos casos, durante la primera hora se inicia el día con ambas persianas totalmente subidas y la iluminancia se mantiene en el límite de 2000 lux, hasta que llega el instante que puede superar este límite y se baja la persiana sur hasta el 30%. En las horas centrales con mayor radiación, en el modo iluminación la persiana sur se baja al 60% y en el modo climatización es necesario bajarla del todo ya que la temperatura de la zona supera la consigna de 26°C. Incluso con la persiana sur bajada del todo, la iluminancia media en la zona supera los 500 lux establecidos de consigna mínima en la zona. Al inicio de la tarde, la radiación incide en la fachada oeste y en ambos modos es necesario bajar esta persiana totalmente, manteniendo la sur subida, para evitar iluminación excesiva y discomfort térmico.

Día característico de verano. Temperatura de la zona.

La figura 7 muestra la evolución de las distintas temperaturas con el fin de evaluar que se cumple el confort térmico en la zona.

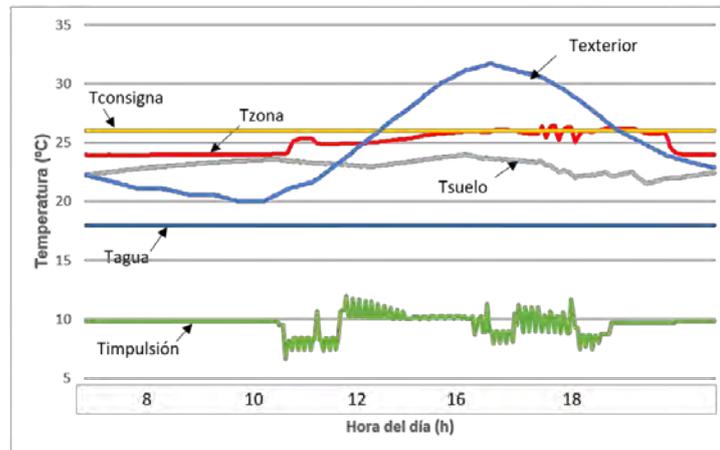


Figura 7. Evolución de la temperatura de la zona, en un día de verano.

El sistema comienza con el suelo radiante encendido desde el inicio del día ya que, debido a su alta inercia, es necesario que entre en funcionamiento un número importante de horas. Como apoyo para combatir la carga, el sistema de expansión directa va impulsando en momentos del día aire a 10°C. Se observa cómo, la curva roja que representa la temperatura de la zona se mantiene en torno a la temperatura de consigna de 26°C, sin llegar a pasarla. Además, la temperatura del suelo es mayor de 22°C, lo suficientemente alto como para prevenir la posible condensación del aire en el suelo.

Consumos de energía en modo refrigeración.

La tabla 2 muestra los consumos de energía para la época de verano (mayo-septiembre) de los diferentes elementos, sin control y con control de persianas, para el modo iluminación y climatización.

Tabla 2: Consumos de energía del sistema en modo refrigeración.

CONSUMOS ENERGÍA (kWh)	BdC	BOMBA	DX	ILUMINACIÓN	
				DIMMER	ON/OFF
MODO ILUMINACIÓN	1102	53	377	226	337
MODO CLIMATIZACIÓN	1068	48	354	233	337
SIN CONTROL DE PERSIANAS	1131	59	387	203	337
AHORRO MODO ILUMINACIÓN (%)	2.5	10.1	2.5	-11	-
AHORRO MODO CLIMATIZACIÓN (%)	5.5	18.6	8.5	-15	-

El modo de climatización consigue un ahorro de energía de un 8.5% en el equipo de expansión directa y de 5.5% en la bomba de calor, mientras que en el modo de iluminación, al priorizar el confort visual al térmico, hace que el ahorro de energía solo alcance un 2.5% tanto en el equipo de expansión directa como en la bomba de calor. En iluminación artificial, el consumo de las luces dimmerizadas es superior al consumo de iluminación sin control,

pasando de 226 kWh a 203 kWh, en modo iluminación. Hay que destacar que los resultados de consumos sin control de persianas incorporan los algoritmos de control de Airzone, que optimizan el funcionamiento de los sistemas consiguiendo un ahorro de energía respecto a los sistemas sin control. Estos resultados no se contemplan en este estudio.

5. Conclusiones

El presente artículo describe un algoritmo de control de persianas integrado con el control zonificado de climatización para un caso de estudio de una vivienda. El modelo tiene en cuenta tanto el confort visual como el térmico de los usuarios. Los resultados obtenidos se obtienen en función del modo de funcionamiento: prioridad al confort visual (modo iluminación) o al ahorro de energía (modo climatización). Se demuestra que el sistema funciona manteniendo el confort térmico y visual y, además, en modo climatización es capaz de conseguir ahorros de hasta un 8.5% en el sistema de expansión directa.

6. Referencias

ASHRAE Handbook. Fundamentals. Atlanta: American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers; 1997.

DAYSIM. <http://www.daysim.com> (último acceso 15.01.18).

GEUMA (Grupo de Energética de la Universidad de Málaga). Informe sobre el modelo de zonificación de Airzone y su comparación con un sistema invertir no zonificado (2011).

Heschong L. Daylighting and human performance. ASHRAE Journal 2002; 44:65–7.

TRNSYS 17. <http://sel.me.wisc.edu/trnsys/> (último acceso 15.01.18).

Yang I, Nam E. Economic analysis of the daylight-linked lighting control system in office buildings. Sol Energy 2010; 84(8):1513-25.

Correspondencia (Para más información contacte con):

Nombre y Apellido: José Miguel Peña Suárez

Teléfono: +34 902 400 445

Fax: +34 902 400 446

E-mail: jmpena@altracorporacion.es

Cesión de derechos

Por la presente, y como autor del trabajo mencionado arriba, cedo al Palacio de Ferias y Congresos de Málaga una licencia no-exclusiva irrevocable para imprimir, reproducir, distribuir, transmitir o comunicar de cualquier manera dicho trabajo, incluyendo el derecho de hacer modificaciones de formato. Además, afirmo que esta cesión no lesiona los derechos de terceros.



Mariano Sidrach-de-Cardona
Llanos Mora-López
María José Márquez-Ballesteros

Universidad de Málaga

Andreas Sumper

Pau Lloret-Gallego

Centre d'Innovació Tecnològica en

Convertidors Estàtics i

Accionaments(CITCEA-UPC),

Departament d'Enginyeria Elèctrica,

Universitat Politècnica de Catalunya.

MEDICIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD ENERGÉTICA

Resumen

Las ciudades son entidades complejas, en las que se superponen numerosos actores y escenarios diversos que no sólo se relacionan con las condiciones físico-ambientales de los territorios sino con bagajes culturales, marcos socioeconómicos y perspectivas históricas que las han moldeado durante siglos. Sin embargo, estos escenarios de complejidad presentan las mayores oportunidades, para las acciones de sostenibilidad, no sólo por la demanda de recursos que es necesaria para el funcionamiento de las ciudades, sino por las repercusiones medioambientales que originan en el planeta.

Partiendo del papel protagonista de las ciudades en el logro de metas globales, con este trabajo se reconoce el peso que tiene el uso de la energía en esta labor, sacando a la luz los distintos aspectos en los que participa y en los que es necesario intervenir si se desea llegar a una ciudad más sostenible energéticamente hablando, lo que conseguirá intrínsecamente una mayor sostenibilidad del conjunto del espacio urbano.

Desde la labor de Naciones Unidas para promover el desarrollo sostenible se reconoce explícitamente el protagonismo del vector energético, y en particular en los *Objetivos del milenio*, el número 7 está dedicado exclusivamente a la energía. Existe una relación trascendental entre energía y desarrollo sostenible que pone de relieve la importancia del acceso a una energía moderna eficiente que permita un control técnico sobre la misma, que contribuya a una economía baja en carbón, y que no sea contaminante.

Desde este trabajo, se propone que los sistemas energéticos que se utilicen en una ciudad coadyuvarán a los logros de sostenibilidad en cualquiera de otros ámbitos. Por tanto, la sostenibilidad energética urbana debe ir encaminada a mejorar el equilibrio de flujos de materias primas y la producción de residuos/contaminantes, lo que mejorará de manera indefectible la habitabilidad urbana, además de favorecer las metas globales de desarrollo sostenible.

Por todo ello, se ha creado una metodología de evaluación de la sostenibilidad energética de la ciudad, en la que se caracteriza el uso final de la energía, los sistemas y flujos energéticos, así como de otros conceptos intrínsecamente relacionados y que deben ser cuantificados tales como, la mejora de la calidad del aire en los entornos urbanos, la reducción de

dependencia de combustibles fósiles con la consiguiente reducción de emisiones de CO₂, la eficiencia energética en el transporte, y en los edificios.

Se han definido tres bloques de indicadores, que convenientemente articulados nos ofrecen una medición objetiva de la sostenibilidad energética de una ciudad:

INDICADORES ENERGÉTICOS BÁSICOS: se corresponden con balance energético del sistema ciudad, y se definen cómo el conjunto de indicadores imprescindibles para tener una información completa de la sostenibilidad energética de una ciudad, atendiendo al metabolismo urbano (vector energético como insumos y vector contaminantes).

INDICADORES ENERGÉTICOS TRANSVERSALES: además del conocimiento del balance energético, se han definido unos indicadores que están relacionados con aquellas acciones que ayudan a mejorar los indicadores energéticos.

INDICADORES ENERGÉTICOS COMPLEMENTARIOS: para el cumplimiento de los objetivos globales de sostenibilidad, se necesita complementar la información con otros indicadores, que, aunque tengan influencia menor y se circunscriban expresamente al ámbito *ciudad*, son necesarios para la valoración global.

Se han evaluado las ciudades de Barcelona y Málaga como ciudades pilotos, en las que comprobar la metodología y establecer directrices para extrapolar las conclusiones a otras ciudades.

Abstract

Cities are complex entities, in which numerous actors and diverse scenarios are superimposed that are not only related to the physical-environmental conditions of the territories but also to the cultural baggage, socio-economic frameworks and historical perspectives that have shaped them for centuries. However, these complexity scenarios present the greatest opportunities for sustainability actions, not only because of the demand for resources that is necessary for their operation but also because of the environmental repercussions that they cause on the planet.

Starting from the leading role of cities in the achievement of global goals, this project recognizes the importance of the use of energy in this work, bringing to light the different aspects in which it intervenes and in which it is necessary to intervene. If you want to reach a more sustainable city energetically speaking, which will intrinsically achieve greater sustainability of the whole urban space.

From the work of the United Nations to promote sustainable development explicitly recognizes the role of the energy, and in particular, in the Millennium Development Goals, the number 7 is dedicated exclusively to energy. There is a transcendental relationship between energy and sustainable development that highlights the importance of access to an efficient modern energy that allows a technical control over it, that contributes to a low carbon economy, and that is not polluting.

From this work, we focus on the fact that the energy systems used in a city will contribute to the achievement of sustainability in any of the other areas. Therefore, urban energy sustainability should be aimed at improving the balance of raw material flows and the production of waste/pollutants, which will unfailingly improve urban habitability, as well as favour the global goals of sustainable development. Therefore, a methodology for evaluating the city's energy sustainability has been created, which characterizes the final use of energy, energy systems and flows, as well as other intrinsically related concepts that must be quantified. like, the improvement of the quality of the air in the urban surroundings, the reduction of dependency of fossil fuels with the consequent reduction of CO₂ emissions, the energetic efficiency in the transport, and in the buildings.

Three blocks of indicators have been defined, which conveniently articulated offer us an objective measurement of the energy sustainability of a city:

BASIC ENERGY INDICATORS: correspond to the energy balance of the city system, and define how the set of essential indicators to have complete information on the energy sustainability of a city, addressing the urban metabolism (energy vector as inputs and vector pollutants).

INSTRUMENTAL ENERGY INDICATORS: besides the knowledge of the energy balance, indicators have been defined that are related to those actions that help to improve the energy indicators.

COMPLEMENTARY ENERGY INDICATORS: for the fulfilment of the global objectives of sustainability, it is necessary to complement the information with other indicators, which, although they have minor influence and are expressly limited to the city area, are necessary for the global assessment.

The cities of Barcelona and Malaga have been evaluated as pilot cities, in which to check the methodology and establish guidelines to extrapolate the conclusions to other cities.

Palabras clave: *sostenibilidad energética urbana, uso final de la energía, descarbonización de la ciudad, energías renovables de producción local, eficiencia energética*

Área temática

Actuaciones sostenibles del espacio urbano

1. Introducción

El futuro sostenible de un mundo en desarrollo está íntimamente relacionado con el acceso a la energía sostenible que transforma y mejora las vidas de quienes carecen de recursos energéticos. Una energía menos contaminante y eficiente es fundamental para alcanzar el desarrollo sostenible y erradicar la pobreza como se establece en el objetivo 7 de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas -Asegurar el acceso a energía asequible, fiable, sostenible y moderna para todos- (Asamblea General de las Naciones Unidas, 2015).

El siglo XX es considerado el siglo de las ciudades porque el desarrollo humano está estrechamente relacionado con el desarrollo urbano. El informe Brundtland llama a este fenómeno *revolución urbana* y dedica el capítulo 9 a *The Urban Challenge* (Brundtland, 1987).

En los últimos cien años, la población urbana ha aumentado exponencialmente, y en 2025, se espera que el setenta y cinco por ciento de la población mundial viva en ciudades. Por ello, casi todos los problemas de desarrollo de la población mundial tendrán que ver con problemas relacionados con el funcionamiento de las ciudades o que han sido originados en ellas o por causas urbanas.

Las ciudades y las áreas urbanas se han configurado como un gran centro de población, consumidor de recursos y foco de emisiones, por lo que se entiende que para lograr los *Objetivos Internacionales de Desarrollo Sostenible* es necesario actuar localmente, por lo que las ciudades y las áreas urbanas son los contextos adecuados en donde se podrían aplicar acciones específicas. Las ciudades se han convertido en actores clave en la lucha contra el cambio climático y la reducción de emisiones, en contraste con el gobierno nacional que encuentra tantos obstáculos para resolver problemas ambientales. (Lee, 2014).

En resumen, las ciudades presentan las mayores oportunidades para el desarrollo humano, convirtiéndose en un foco de acciones de sostenibilidad, y en particular, deben jugar un papel

importante en las iniciativas de promover una energía sostenible. Su acción práctica sobre el terreno es esencial para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y para proteger a sus ciudadanos de los efectos del cambio climático.

2. Estado de la cuestión

2.1. Antecedentes y estado del arte

En la actualidad existe una preocupación global por la descarbonización de las actividades humanas en general, y en particular en la descarbonización de las ciudades. Muchos de los proyectos desarrollados en el ámbito urbano tienen que ver con el uso más sostenible de la energía, evitando aquellas fuentes contaminantes y promoviendo la generación energética con renovables. Además, cabe añadir no sólo la preocupación por los efectos del cambio climático, sino que la calidad del aire de las ciudades es un elemento fundamental para garantizar la salud de las personas.

Es necesario especificar objetivos claros y mediciones adecuadas para el cumplimiento de las metas temporales claves, para los horizontes 2020, 2030 y 2050, así como establecer una metodología objetiva para cuantificar los logros que se vayan alcanzando.

Si se quiere evaluar la sostenibilidad energética en el ámbito urbano, es imprescindible establecer si actualmente existe una metodología adecuada a esta necesidad. Por lo que, en un primer lugar se realiza un estudio de los principales índices de evaluación de energía, de ciudades y de sostenibilidad para comprobarlo.

Seguidamente se analizan los indicadores de los principales índices y grupos de indicadores clasificados según su relevancia para la medición de la sostenibilidad energética urbana. La revisión del estado del arte permitirá además identificar carencias y bondades en los índices actuales respecto a la sostenibilidad energética urbana.

En total se han analizado 26 índices internacionales, y se han utilizado las temáticas definidas en la norma *UNE-ISO 37120:2015: Desarrollo sostenible de comunidades. Indicadores para los servicios de las ciudades y la calidad de vida*, con el objetivo de comparar los temas cubiertos por cada uno de ellos.

De todos los índices analizados, 15 se centraban en ciudades frente a los 11 restantes que tienen como objeto el análisis a países. Éstos últimos han sido históricamente más desarrollados y por tanto son una fuente relevante de información acerca de tipos de indicadores y metodología utilizada, sobre todo en la temática energética. Además, en el área de sostenibilidad energética, los índices más desarrollados también tienen como ámbito de aplicación los países.

En cambio, los índices aplicados a ciudades tratan comúnmente temas más relacionados con el ámbito social y se centran en la sostenibilidad urbana en general. Algunos de ellos también incluyen referencias a la temática energética, aunque en su práctica totalidad sea de forma testimonial y con unos pocos indicadores de esta temática.

Además, la mayoría de índices existentes aplicables a ciudades cubren un número mayor de ámbitos de sostenibilidad definidos en la norma *UNE-ISO 37120:2015* [10], mientras que los aplicados a países padecen considerables deficiencias en la cantidad de ámbitos cubiertos.

Tras el análisis se verificó que ningún índice de sostenibilidad energética era específico de las ciudades, ya que se diseñaron específicamente para países, como el Índice de Desarrollo de Energía Sostenible (Iddrisu y Bhattacharyya, 2015) o el Índice Energy Trilemma (Wyman, O & World Energy Council, 2013), y ningún índice de sostenibilidad en la ciudad tenía energía

como eje central y transversal, como vemos, por ejemplo en el Índice de Ciudades Sostenibles (Arcadis, 2016) o en el Índice de Ciudad Verde (SIEMENS)

Partiendo de los 26 índices analizados, se han seleccionado una serie de indicadores según su adecuación al objeto del presente estudio. Además, también se han incorporado a la revisión indicadores de las siguientes fuentes:

- Energy Indicators for Sustainable Development propuestos por la International Atomic Energy Agency
- Local Energy Sustainable Indicators propuestos en
- La norma UNE-ISO 37120:2015: Desarrollo sostenible de comunidades. Indicadores para los servicios de las ciudades y la calidad de vida.

En total se han analizado 127 indicadores. A partir de los indicadores utilizados en cada índice, se han identificado las temáticas más frecuentes entre los índices seleccionados. En concreto, destacan los indicadores sobre cambio climático y gases de efecto invernadero, producción y consumo energético, energía renovable, gestión de residuos, y calidad del aire. Estos 5 temas están fuertemente relacionados entre sí y son clave para alcanzar un desarrollo energético sostenible. Además, destacan por su directa relación con la energía las siguientes temáticas de indicadores: suministro energético, transporte, combustibles fósiles, eficiencia energética y precio de la energía.

2.2. Necesidad de cuantificar exactamente la sostenibilidad energética en la ciudad

Existen numerosos índices e indicadores de la sostenibilidad global de una ciudad, en cuanto a las dimensiones social, medioambiental y económica, sin embargo nuestro objetivo es cuantificar cuanto de sostenible es una ciudad en el ámbito energético, por lo que los indicadores que se seleccionen deben dar una información precisa del uso final que se hace de la energía en el ámbito urbano, así como de la evaluación de la calidad de la misma y de las consecuencias medioambientales que pueden derivarse.

Tras el análisis de la situación actual podemos afirmar que no existe un conjunto de indicadores que valoren de manera conjunta y completa el uso final de la energía urbana de manera sostenible.

Se entiende que es necesario desarrollar una herramienta capaz de evaluar y cuantificar los progresos que en materia de descarbonización energética que se están realizando en barrios y entornos urbanos. Sólo si se mide de manera precisa la evolución de los datos podremos evaluar la efectividad de las medidas y poder cumplir los objetivos de sostenibilidad de los próximos horizontes temporales.

3. Metodología desarrollada

Las ciudades son grandes consumidores de energía, generada, en su mayor parte, lejos de ellas. Esos problemas de producción y transporte externalizan numerosas consecuencias ambientales al entorno externo y al territorio. Por esta razón, uno de los factores clave que deben considerarse en la mejora de la sostenibilidad energética urbana es el lugar donde producimos la energía consumida en la ciudad, así como su uso final, estudiando las fuentes de producción y la ubicación de las mismas.

Por esto, la evaluación de la sostenibilidad urbana debe basarse en las teorías del metabolismo urbano, ya que la energía es uno de los principales insumos y es determinante en el metabolismo de la ciudad.

El metabolismo urbano se ha definido dentro de la disciplina de ecología urbana como la suma total de los procesos técnicos y socioeconómicos que ocurren en las ciudades, lo que resulta en crecimiento, producción de energía y eliminación de desechos (Kennedy et al., 2007). Este método examina las entradas, salidas y almacenamiento de energía, agua, contaminantes, nutrientes, materiales y desechos (González et al, 2013, p.109).

Este trabajo se centra en la sostenibilidad energética urbana, por lo que se estudian los componentes específicos del metabolismo urbano, como los insumos energéticos y los contaminantes, para así poder evaluar el balance energético urbano.

La evaluación de la sostenibilidad energética se centra en los flujos de energía urbana, estableciendo las diferentes fuentes de energía que ingresan a la ciudad, identificando los diferentes consumos de energía y, en la medida de lo posible, su uso final.

La hipótesis de partida se basa, por tanto, en suponer que una ciudad más sostenible es aquella en la que se ha producido una sustitución del uso de combustibles fósiles hacia energías menos contaminantes. Atendiendo a este planteamiento de partida, se entiende que la sostenibilidad energética urbana se mejora cuando:

- La energía consumida (tanto térmica como eléctrica) se produce lo más cerca al consumo, y siempre por fuentes renovables.
- La calidad del aire no empeora por ningún uso energético, incluyendo el transporte.
- Las ciudades son eficientes en cuanto a la movilidad y al uso de energía en edificios.
- Hay acceso a energías limpias de calidad por parte de toda la población
- Se promueve el reciclado y aprovechamiento de los residuos, lo que produce un gran ahorro energético.

En definitiva, se plantea un escenario actual y una evolución deseable para escenarios futuros, en los que los combustibles fósiles sean sustituidos en su mayor parte por renovables y por una mayor electrificación obtenida por fuentes renovables.

La metodología propuesta persigue un doble objetivo. En primer lugar, se entiende que la evaluación de la sostenibilidad energética de una ciudad lleva implícita el cumplimiento de objetivos globales de desarrollo sostenible aceptados internacionalmente que están relacionados con la energía.

Y, en segundo lugar, se entiende que para evaluar la sostenibilidad energética en la ciudad es fundamental conocer los consumos energéticos urbanos y sus efectos, ya que la manera en la que se use la energía determinará la sostenibilidad del sistema y su eficiencia.

Con estos dos bloques de trabajo, por un lado, cumplimiento de objetivos internacionales en cuanto a la sostenibilidad energética de la ciudad y por otro el estudio del consumo final de energía, se entiende que los indicadores que se diseñen deben estar específicamente encaminados a la evaluación de estos conceptos, para así permitir que las ciudades puedan evaluar el cumplimiento de objetivos específicos de sostenibilidad energética.

3.1. Objetivos urbanos para un desarrollo sostenible en materia energética

Tal y como se vio en el epígrafe de estado del arte, tras la identificación y análisis de los índices existentes que pudieran tener alguna relación con el estudio, no existe ninguno que abarque de manera tan específica la sostenibilidad energética urbana.

Para verificar el cumplimiento de objetivos globales de sostenibilidad se seleccionaron de entre todos los documentos internacionales analizados, los siguientes, por ser los más

determinantes en cuanto al alcance global, en cuanto a su importancia y en cuanto a la aceptación generalizada:

- Objetivos Europa 2020-2030-2050
- Sustainable urban energy planning
- Protocolo de Kyoto
- Habitat III – ONU
- Meeting Abu Dhabi - Habitat III: Sustainable Energy and Cities
- Objetivos de desarrollo Sostenible de la ONU
- Conferencia de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático-COP21

Una vez analizados los objetivos de los documentos internacionales consultados en materia de sostenibilidad energética, se ha diseñado una estructuración en 5 objetivos globales. Partiendo de estos, se desarrollaron objetivos pormenorizados en cada uno de los bloques, así como la cuantificación de los mismos, lo que servía para agrupar conceptos y poder estructurar mejor el diseño de los indicadores.

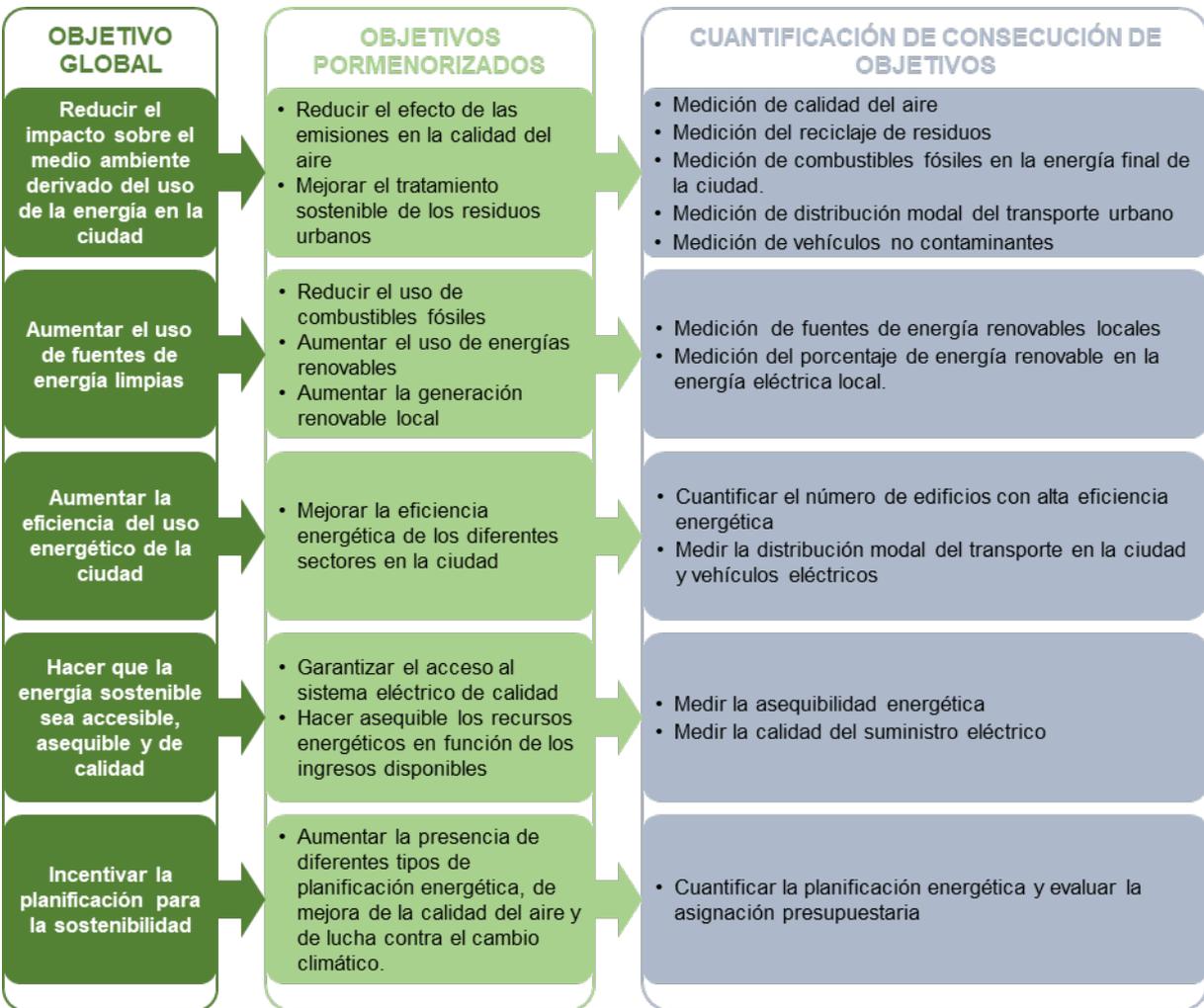


Figura -1 Resumen de objetivos y medidas para su cuantificación

3.2. Determinación de objetivos energéticos urbanos y su cuantificación

Se parte del segundo bloque de trabajo, en el que, desde las teorías del metabolismo urbano, se aísla el vector energía y se estructura según sus fuentes y su lugar de producción.

Los insumos energéticos se han dividido básicamente en dos bloques: consumos térmicos y consumos eléctricos. De los consumos energéticos eléctricos, se diferencia entre aquellos que viene desde el exterior y aquellos producidos en la ciudad, y de los térmicos, aquellos que se obtiene de combustibles fósiles y los de renovables.

Es importante diferenciar los consumos eléctricos de los consumos térmicos (agua caliente sanitaria o calefacción, por ejemplo). Estos usos finales de la energía se producen en gran medida por la quema de combustibles fósiles, lo que sería en muchos casos sustituible por renovables térmicas de producción local, con la consiguiente reducción de emisiones de efecto invernadero, y mejora de la calidad del aire.

Por otro lado, un factor importante a tener en cuenta en el aumento de la sostenibilidad urbana pasa necesariamente por la generación de energía dentro de la ciudad a partir de fuentes renovables. De esta manera, a estos dos bloques (electricidad y combustibles fósiles) se debe añadir un factor que nos permita cuantificar cómo aumenta la generación de energía eléctrica renovable en la ciudad.

La suma por tanto de consumo de energía eléctrica externa + consumo de energía eléctrica interna + consumo de energía térmica interna + consumo de combustibles fósiles configuran en un primer orden de aproximación el consumo energético total de una ciudad.

Finalmente es necesario apuntar que, frente a otros trabajos, en este se ha considerado imprescindible distinguir la parte de energía eléctrica que llega a la ciudad y que es producida con renovables (*mix eléctrico*) de la producida con renovables de forma local. Es necesario separar y disgregar las renovables lo máximo posible, ya que para hacer un buen balance energético y entender posibles acciones urbanas se deben distinguir claramente aquellos conceptos que escapan a las políticas locales. Es muy importante el planteamiento de ir hacia un modelo energético donde la generación eléctrica sea 100% renovable, pero al mismo tiempo, es fundamental conocer qué proporción de la misma se ha generado localmente.

Los indicadores deben servir para evaluar el balance energético de la ciudad y para conocer la evolución de los objetivos globales de sostenibilidad energética lo que ayudará a la implementación de acciones correctivas por las autoridades locales. Cada indicador debe evaluar un aspecto concreto de la sostenibilidad energética urbana, sin existir duplicidades de medidas innecesarias, que sólo aportaría imprecisiones.

3.3. Determinación y diseño de los indicadores para la sostenibilidad energética en el ámbito urbano

Una vez establecidos los criterios generales que deben cumplir los indicadores, la propuesta que se hace es agruparlos según la tipología de cada uno. Se han definido tres grandes bloques de indicadores según su naturaleza:

- Indicadores energéticos: son los que miden flujos energéticos y contaminantes, relacionados con el metabolismo urbano. Son los indicadores principales para estudiar la sostenibilidad energética ya que forman parte del sistema ciudad y están condicionados por políticas y acciones locales. Este grupo de indicadores aporta, en

una primera aproximación, una información completa de la sostenibilidad energética de una ciudad (insumos y contaminantes asociados).

Tabla 1. Indicadores energéticos básicos

<p>COMBUSTIBLES FÓSILES – E1</p>	<p>Una de las acciones claves para la sostenibilidad energética urbana es la descarbonización de las ciudades. Obtener una medición de la cantidad de energía final que proviene de los combustibles fósiles da una información fundamental respecto a la evolución del traspaso de combustibles fósiles a electricidad y a energías limpias que se esté produciendo en la ciudad.</p>
<p>PRODUCCIÓN ELÉCTRICA LOCAL CON RENOVABLES – E2</p>	<p>La descarbonización de las ciudades implica en gran parte una mayor electrificación de las mismas. Este aumento de la demanda eléctrica debe cubrirse con aporte de renovables ya que, si no, simplemente se estaría desplazando el problema a las grandes centrales térmicas de producción eléctrica. Además, se entiende como fundamental que la producción prioritaria con renovables sea en consumo, por lo que este indicador medirá que parte de la energía final eléctrica es producida de manera local, desagregando el consumo eléctrico del total de la ciudad.</p>
<p>PRODUCCIÓN TÉRMICA LOCAL CON RENOVABLES – E3</p>	<p>Para completar el balance energético urbano, se necesita conocer qué parte de la energía térmica es producida con renovables dentro de la ciudad. En este caso, se desagrega la energía térmica de la eléctrica para conocer las dos maneras de producir energía con renovables de manera local.</p> <p>No es frecuente ver este indicador desagregado del anterior, ya que la energía renovable suele analizarse de manera conjunta (térmica y eléctrica). Para tener la información completa del comportamiento energético de la ciudad, es imprescindible tener estos indicadores desagregados, para plantear acciones concretas, además de obtener la evolución detallada de las energías renovables que esté produciendo una ciudad.</p>
<p>CALIDAD DEL AIRE – E4</p>	<p>Según la Organización Mundial de la salud, la contaminación del aire es un riesgo medioambiental muy importante para la salud, y está estrechamente relacionado con los usos energéticos. Es, por tanto, necesario definir un indicador que garantice su evaluación y que pueda ser utilizado para cuantificar la mejora de la calidad de vida de los ciudadanos.</p> <p>Entre los numerosos contaminantes atmosféricos destacan los originados principalmente por las actividades de producción de energía y transporte, como el monóxido de carbono (CO), el dióxido de azufre (SO₂), los óxidos de nitrógeno (NO_x, NO y NO₂) y las partículas primarias (Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental y medio natural, 2013).</p> <p>Para su formulación se han seguido las Directrices de la OMS sobre la Calidad del Aire, publicadas en 2005, y las directrices de la Directiva 2008/50/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 21 de junio de 2008, relativa a la calidad del aire ambiente y a una atmósfera más</p>

Tabla 2. Límites utilizados para los contaminantes atmosféricos seleccionados			
CO _{lim}	OMS y Dir. EU 2008/50/EC		10 (8h) mg/m ³
NOX _{lim}	OMS y Dir. EU 2008/50/EC		40 (anual) µg/m ³
PM _{lim}	OMS		20 (anual) µg/m ³
SO2 _{lim}	Dir. EU 2008/50/EC (CE)	para media anual	20 (anual) µg/m ³
		para máx. diarios	125 (24h) µg/m ³
<p>limpia en Europa, ya que supone una revisión a las anteriores normativas.</p> <p>Se han aplicado los límites que se establecen para media anuales mejor que medias diarias ya que nos ofrecen unas conclusiones más fiables que las de un solo día que puede estar relacionado con un episodio concreto o situaciones puntuales no representativas. También se ha escogido el valor límite más restrictivo de entre los dos documentos consultados. Se tienen en cuenta cuatro contaminantes atmosféricos y los valores límites de la siguiente tabla:</p>			

- Indicadores transversales: este grupo de indicadores está relacionado con acciones que ayudan a mejorar los indicadores energéticos.

Tabla 3. Indicadores energéticos transversales

PORCENTAJE DE VEHÍCULOS NO CONTAMINANTES – T1	<p>La contaminación ambiental en las ciudades está causada mayoritariamente por los vehículos que usan combustibles fósiles, especialmente la gasolina y el gasoil. Por este motivo, apostar por vehículos con cero emisiones es una vía importante para mejorar la calidad del aire en la ciudad, siempre que la energía que se utilice provenga de fuentes renovables.</p> <p>El indicador de vehículos no contaminantes mide el porcentaje de vehículos no contaminantes respecto al volumen total de vehículos. Se considera vehículos no contaminantes aquellos que no emiten ningún tipo de contaminante como los eléctricos, y no se han tenido en cuenta los híbridos. Se tienen en cuenta todo tipo de vehículos urbanos, autobuses, turismos, camiones y furgonetas, motocicletas y ciclomotores.</p>
TRABAJADORES QUE SE DESPLAZAN SIN VEHÍCULO PRIVADO – T2	<p>La distribución modal del transporte en una ciudad es fundamental para su buen funcionamiento, ya que otro de los grandes problemas de las ciudades es la congestión del tráfico, así como la siniestralidad y la contaminación acústica y ambiental.</p> <p>Es importante contar con un indicador que mida la distribución modal del transporte porque la mejora de este influye directamente en los consumos energéticos de la ciudad, en la disminución del consumo</p>

	<p>de combustibles fósiles, en la mejora de la calidad del aire, e indirectamente en la calidad del espacio urbano, consiguiendo ciudades más humanas, accesibles, inclusivas y seguras.</p> <p>El gran reto de la sostenibilidad energética en cuanto a la movilidad urbana es solucionar el uso abusivo del vehículo privado en los desplazamientos al trabajo, ya que los datos en otros motivos de desplazamientos son menos preocupantes. Por esta razón, de todos los desplazamientos que se producen en una ciudad, se utilizara para el cálculo del indicador el reparto modal con motivo de desplazamientos al trabajo, o en defecto, desplazamientos en día laborable.</p>
<p>EDIFICIOS CON ALTA CALIFICACIÓN ENERGÉTICA – T3</p>	<p>La eficiencia energética, junto con las renovables, son ejes trascendentales en el cambio hacia una mayor sostenibilidad energética.</p> <p>De manera generalizada, la eficiencia energética se analiza con el indicador de intensidad energética, que tiene en cuenta datos como el PIB del país. No se han querido utilizar conceptos macroeconómicos que poca información aportan a una ciudad y a los agentes implicados, y se ha preferido acudir a conceptos fácilmente asimilables a políticas y acciones realizables en la ciudad y con gran repercusión en la sostenibilidad energética de la misma.</p> <p>La eficiencia energética en edificios es una de las acciones que más demanda van a tener en los próximos años para asegurar escenarios de reducción de demanda energética. A su vez, los certificados energéticos de edificios se han convertido en una herramienta para evaluar la sostenibilidad energética de los mismos, y cada vez son más los países que los incorporan. Los certificados de cada país tienen en cuenta las condiciones climáticas y el uso del edificio en cuanto a las consideraciones de demanda energética y de emisiones. De esta manera, de usar este indicador se estarían incorporando las apreciaciones específicas de cada ciudad.</p> <p>El indicador quiere cuantificar el porcentaje de edificios que tienen alta y muy alta calificación energética respecto al total. Este indicador requiere no sólo que los edificios se construyan o rehabiliten con alta calificación, sino que las autoridades municipales o regionales sean capaces de generar un registro de los mismos si quieren mejorar la calificación energética del indicador.</p>
<p>PLANES DE SOSTENIBILIDAD ENERGÉTICA URBANA – T4</p>	<p>El planeamiento urbano es una de las maneras más efectivas para reducir la demanda energética y reducir el impacto medioambiental del funcionamiento cotidiano de la ciudad.</p> <p>Dentro de esta planificación energética no sólo se incluye aquella que tiene que ver con las infraestructuras energéticas propiamente dichas, como las instalaciones de producción local por renovables, sino también aquellos planes que dan soporte al nuevo sistema, como el ahorro energético en edificios para aumentar la eficiencia energética tanto en nueva construcción como en rehabilitación, los planes de movilidad que incluyen la articulación de los espacios públicos para potenciar la movilidad no motorizada, el fomento de los vehículos no contaminantes con la implementación de medidas que</p>

	lo favorezcan y los planes de calidad del aire. Para su evaluación, se tiene en cuenta tanto la existencia de planes como la existencia de medidas económicas que soporten su implementación, ya sea a través de presupuestos propios o en la búsqueda y articulación de programas de subvenciones, ayudas y proyectos de ámbito interurbano.
--	---

- Indicadores complementarios: el tercer conjunto de indicadores matiza o complementan la información de los indicadores de los grupos anteriores. Dependen de factores externos a la ciudad, pero de alguna manera contribuyen a la sostenibilidad del sistema urbano.

Tabla 4. Indicadores energéticos complementarios

TASA DE RECICLAJE DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS – C1	Dentro del estudio del metabolismo urbano que se plantea en el proyecto, no sólo tienen importancias los insumos energéticos que necesita el sistema ciudad, sino la gestión de los residuos y contaminantes derivados. El tratamiento y reciclaje de los residuos sólidos urbanos es muy importante para la mitigación del impacto ambiental y para hacer más sostenible el sistema. El reciclaje de residuos supone un ahorro energético considerable y una disminución de la huella ecológica de la ciudad, aunque su influencia sea de un ámbito mayor que el sistema urbano propiamente dicho. El indicador propuesto mide el porcentaje de residuos sólidos urbanos que son reciclados en la ciudad.
RENOVABLES EN LA PRODUCCIÓN ELÉCTRICA EXTERNA – C2	En líneas generales, dentro de los objetivos globales de sostenibilidad energética el aumento de renovables en la producción de energía siempre es uno de los factores claves. Sin embargo, es importante diferenciar con otro indicador qué parte de la energía eléctrica producida externa a la ciudad proviene de fuentes renovables, sin mezclar con la energía eléctrica producida de manera local con renovables, ya que se considera complementario al indicador de producción eléctrica local por renovables, pero no equiparable, pues tiene connotaciones ambientales muy diferentes, así como mayor huella ecológica.
ASEQUIBILIDAD ENERGÉTICA – C3	El séptimo Objetivo de Desarrollo Sostenible se refiere a la garantía acceso a una energía asequible, fiable, sostenible y moderna para todos. Esto implica que la energía es un derecho fundamental al que debería tener acceso toda la población. Por lo tanto, se debe incluir un indicador que cuantifique el coste energético para los hogares, siendo el concepto de este indicador que el acceso a la energía no se convierta en un gasto excesivo e inasumible para las familias. Se ha tomado como referencia la que aporta la Asociación de Ciencias Ambientales en sus dos informes sobre pobreza energética, en la que se determina que el gasto energético no debe ser superior al 10 % de la renta neta familiar (ACA,2012).
CALIDAD SUMINISTRO ELÉCTRICO - C4	En los objetivos de desarrollo sostenible de la ONU se hace hincapié en la necesidad de satisfacer el acceso universal a fuentes de energía modernas. Se considera que la energía que más contribuye al desarrollo de las regiones es la electricidad, por lo que será el acceso a

suministro eléctrico el indicador que mida el acceso universal a fuentes de energía modernas.

Para garantizar la sostenibilidad del sistema energético es fundamental la seguridad de suministro, ya que la demanda energética de la ciudad debe estar garantizada para su correcto funcionamiento. La asequibilidad es insuficiente si no hay un suministro fiable de energía. En muchos lugares del mundo en desarrollo, las fuentes de energía suelen ser escasas y el suministro es intermitente.

El indicador diseñado ha tenido en cuenta las dos mediciones de calidad de suministro estandarizadas en España, como son el TIEPI (en función del tiempo de las interrupciones) y el NIEPI (en función del número de interrupciones). Sin embargo, internacionalmente el indicador más utilizado para medir la calidad de suministro eléctrico es el SAIDI, por lo que en estos casos se usaría este indicador en lugar del TIEPI y NIEPI.

3.3. Aplicación de datos a los indicadores y resultados

Para la búsqueda de datos para el cálculo de los indicadores se han seguido los siguientes criterios generales:

- Sobre el contorno o perímetro del área de los datos: para el cálculo de los indicadores se han utilizado datos municipales. En los casos en que los datos municipales no se encontraban disponibles, se han realizado extrapolaciones o se han utilizado directamente los valores más desagregados posibles, ya sean de ámbito metropolitano, provincial, autonómico o estatal.

2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
31,19 E1	49,02 E1	31,39 E1	32,23 E2	34,66 E2	33,91 E2	31,73 E2	31,62 E2
2,24 E2	29,99 E2	2,88 E2	3,10 E3	3,61 E3	4,18 E3	4,33 E3	4,20 E3
5,86 E3	2,67 E3	9,99 E3	14,39 E4	12,17 E4	14,16 E4	13,23 E4	13,37 E4
46,97 E4	7,65 E4	44,56 E4	40,05 E4	43,34 E4	53,05 E4	45,37 E4	42,66 E4
0,00 T1	0,01 T1	0,01 T1	0,01 T1	0,01 T1	0,02 T1	0,03 T1	0,04 T1
31,95 T2	34,68 T2	34,68 T2					
0,00 T3	0,03 T3	0,55 T3	0,94 T3	1,33 T3	2,00 T3	2,62 T3	3,13 T3
10,00 T4	10,00 T4	10,00 T4	40,00 T4	50,00 T4	50,00 T4	60,00 T4	60,00 T4
47,81 C1	50,50 C1	47,90 C1	58,00 C1	63,13 C1	77,15 C1	70,26 C1	47,65 C1
4,95 C2	12,75 C2	26,35 C2	28,70 C2	23,39 C2	32,69 C2	28,16 C2	28,41 C2
70,25 C3	68,94 C3	63,01 C3	56,71 C3	55,85 C3	55,99 C3	57,59 C3	58,12 C3
38,41 C4	48,30 C4	54,60 C4	62,17 C4	64,81 C4	64,75 C4	66,25 C4	72,94 C4

leyenda:	óptimo	bueno	malo	muy malo	pésimo
----------	--------	-------	------	----------	--------

- Sobre la falta de datos: si en un indicador no hay ningún dato disponible, se considera que la ciudad no presta suficiente atención al aspecto de sostenibilidad energética del datos, pero no de todos los años, se interpola entre los años con datos disponibles o
- se mantiene el último valor si no hay más datos disponibles.
- La valoración de las puntuaciones se hace de 0 a 100, siendo datos porcentuales, fácilmente valorables. El valor 100 % es el objetivo óptimo que se debe alcanzar.

Los resultados para cada una de las ciudades analizadas se recogen en las siguientes tablas:

2008		2009		2010		2011		2012		2013		2014		2015	
44,3	E1	45,6	E1	40,68	E1	43,03	E1	42,03	E1	42,84	E1	42,8	E1	42,8	E1
0,59	E2	0,84	E2	0,92	E2	0,99	E2	1,13	E2	1,23	E2	1,25	E2	1,35	E2
0,96	E3	0,92	E3	1,04	E3	1,21	E3	1,22	E3	1,06	E3	1,03	E3	0,97	E3
11,5	E4	10,7	E4	27,19	E4	22,33	E4	24,55	E4	36,02	E4	38,4	E4	28,9	E4
0,01	T1	0,05	T1	0,10	T1	0,11	T1	0,14	T1	0,19	T1	0,2	T1	0,22	T1
71,6	T2	72,1	T2	72,48	T2	73,34	T2	73,33	T2	73,53	T2	73,8	T2	73,9	T2
0	T3	0	T3	0,00	T3	0,01	T3	0,03	T3	0,43	T3	0,74	T3	1,02	T3
70	T4	70	T4	70,00	T4	90,00	T4	100	T4	100	T4	100	T4	100	T4
32,4	C1	32,4	C1	39,50	C1	37,90	C1	37,10	C1	36,2	C1	36,1	C1	35,7	C1
11,3	C2	13,1	C2	14,87	C2	13,66	C2	14,73	C2	21,25	C2	20,2	C2	17,4	C2
76,8	C3	76,8	C3	76,25	C3	76,02	C3	75,44	C3	75,23	C3	76,9	C3	77,9	C3
70,5	C4	59,3	C4	68,85	C4	71,26	C4	74,95	C4	75,88	C4	75,3	C4	73,9	C4

leyenda: ■ óptimo ■ bueno ■ malo ■ muy malo ■ pésimo

Tabla 5. Valores de los indicadores para la ciudad de Barcelona

2008		2009		2010		2011		2012		2013		2014		2015	
31,19	E1	49,02	E1	31,39	E1	32,23	E2	34,66	E2	33,91	E2	31,73	E2	31,62	E2
2,24	E2	29,99	E2	2,88	E2	3,10	E3	3,61	E3	4,18	E3	4,33	E3	4,20	E3
5,86	E3	2,67	E3	9,99	E3	14,39	E4	12,17	E4	14,16	E4	13,23	E4	13,37	E4
46,97	E4	7,65	E4	44,56	E4	40,05	E4	43,34	E4	53,05	E4	45,37	E4	42,66	E4
0,00	T1	0,01	T1	0,01	T1	0,01	T1	0,01	T1	0,02	T1	0,03	T1	0,04	T1
31,95	T2	34,68	T2	34,68	T2										
0,00	T3	0,03	T3	0,55	T3	0,94	T3	1,33	T3	2,00	T3	2,62	T3	3,13	T3
10,00	T4	10,00	T4	10,00	T4	40,00	T4	50,00	T4	50,00	T4	60,00	T4	60,00	T4
47,81	C1	50,50	C1	47,90	C1	58,00	C1	63,13	C1	77,15	C1	70,26	C1	47,65	C1
4,95	C2	12,75	C2	26,35	C2	28,70	C2	23,39	C2	32,69	C2	28,16	C2	28,41	C2
70,25	C3	68,94	C3	63,01	C3	56,71	C3	55,85	C3	55,99	C3	57,59	C3	58,12	C3
38,41	C4	48,30	C4	54,60	C4	62,17	C4	64,81	C4	64,75	C4	66,25	C4	72,94	C4

leyenda: ■ óptimo ■ bueno ■ malo ■ muy malo ■ pésimo

Tabla 6. Valores de los indicadores para la ciudad de Málaga

Respecto a los indicadores energéticos básicos, Barcelona destaca por su menor utilización de los combustibles fósiles (E1), mientras que en Málaga la calidad del aire (E4) es significativamente mejor que en Barcelona. En las dos ciudades, los indicadores de generación renovable local (E2 y E3) son relativamente bajos, sobretodo en Barcelona, y también necesitan mejorar en la eficiencia energética de edificios (T3). Además, Barcelona destaca en el poco uso de vehículos privados (T2), la planificación en sostenibilidad energética (T4) y la calidad de suministro eléctrico (C4), mientras que Málaga destaca en el reciclaje de residuos sólidos urbanos (C1) y en el uso de renovables en el mix eléctrico de producción externa (C2).

4. Conclusiones

La mejora de la sostenibilidad energética urbana es una necesidad que hasta ahora no tenía un método de evaluación claro. Con esta selección de indicadores se pretende recoger todos los aspectos necesarios para la mejora de la ciudad a nivel energético, reconociendo el papel protagonista de las ciudades en la consecución del desarrollo sostenible del planeta.

Es necesario recoger los consumos energéticos de la ciudad, desagregando lo máximo posible el uso final y el origen de la energía, porque sólo desde ese análisis se pueden entender si las acciones y políticas de una ciudad van en la dirección correcta.

En cuanto a la aplicabilidad real de la medición de la sostenibilidad energética en las ciudades, es necesario tener acceso a datos muy concretos sobre energía urbana, por lo que sería deseable que las ciudades trabajen más en la dirección de proporcionar datos abiertos y de calidad, ya que sólo así se puede de verdad evaluar la sostenibilidad energética, y cómo determinadas acciones la mejoran o no.

En general, cualquier ciudad que cuente con agenda local 21 y que se haya sumado al pacto de alcaldes, debe tener prácticamente la totalidad de los datos que se necesitan. Por ahora se han estudiado dos ciudades españolas, Barcelona y Málaga, pero el principal objetivo es conseguir que en un futuro cualquier ciudad pueda aplicar esta metodología y conocer su grado de sostenibilidad energética, así como comprobar si determinadas acciones y políticas contribuyen a la mejora de la misma.

5. Referencias

- ACA (Asociación de Ciencias Ambientales), Informe sobre pobreza energética en España, ACA, Madrid, 2012.
- Brundtland, G.H. (1987). Our common future: Report of the 1987 World Commission on Environment and Development. United Nations, New York
- Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental y medio natural, Plan Nacional de calidad del aire y protección de la atmósfera 2013-2016, Ministerio de agricultura, alimentación y medioambiente, 2013.
- European Parliament. DIRECTIVE 2008/50/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 21 May 2008 on ambient air quality and cleaner air for Europe. Official Journal of the European Union L 152/1, 11-6-2008.
- General Assembly of United Nation. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development (Resolution adopted by the General Assembly on 25 September 2015). UN, 2015.
- Gonzalez, A et al. A decision-support system for sustainable urban metabolism in Europe. *Environmental Impact Assessment Review* 38 (2013) 109– 119. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2012.06.007>
- Kennedy C, Cuddihy J, Engel-Yan J. The changing metabolism of cities. *Journal of Industria Ecology* 2007; 11(2): 43-59. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2012.06.007>
- Kennedy C, Pincet S, Bunje P. The study of urban metabolism and its applications to urban planning and design. *Environ Pollut* 2011;159:1965–73.
- Iddrisu, I., & Bhattacharyya, S. C. (2015). Sustainable Energy Development Index: A multi-dimensional indicator for measuring sustainable energy development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 513–530. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2015.05.032>

Lee, T. Global Cities and Climate Change: The Translocal Relations of Environmental Governance. Routledge, 2014. 2-4

Wyman, O & World Energy Council. (2013). World Energy Trilemma 2013: Energy Sustainability Index, London, UK.

ARCADIS. (2016). Sustainable-cities-index. [On line]. Available: <https://www.arcadis.com/en/global/our-perspectives/sustainable-cities-index-2016/>

SIEMENS. (2017). The Green City Index. [On line]. Available: www.siemens.com/entry/cc/en/greencityindex.htm.

Correspondencia (Para más información contacte con):

Nombre y Apellido: Mariano Sidrach de Cardona Ortín
Teléfono: +34 951952299
Fax: +
E-mail: msidrach@uma.es

Cesión de derechos

Por la presente, y como autor del trabajo mencionado arriba, cedo al Palacio de Ferias y Congresos de Málaga una licencia no-exclusiva irrevocable para imprimir, reproducir, distribuir, transmitir o comunicar de cualquier manera dicho trabajo, incluyendo el derecho de hacer modificaciones de formato. Además, afirmo que esta cesión no lesiona los derechos de terceros.



Carmen Cordovilla González
Gabriel Jarillo Rodríguez
Jorge F. Blanquer Jaraíz
Metro de Madrid S.A.

SISTEMA DE GESTIÓN AMBIENTAL DE METRO DE MADRID

Resumen

Toda actividad humana acarrea una serie de consecuencias en el entorno y los gobiernos, empresas y sociedad juegan un papel crucial para limitar el daño y preservar los recursos.

La preocupación de Metro de Madrid por el respeto ambiental no es algo reciente, puesto que desde los años 80 se vienen realizando acciones e inversiones para minimizar el impacto sobre el entorno.

A pesar de las dificultades que puede suponer para una compañía la dimensión en cuanto a número de trabajadores y de instalaciones, la dispersión geográfica de los centros de trabajo, la antigüedad de las instalaciones y el grado de externalización de actividades, Metro de Madrid se convirtió en el año 2005 en líder en el sector al ser el primero de los grandes Metros del mundo en implantar un Sistema de Gestión Ambiental aplicable a toda su actividad y certificado bajo la norma ISO 14001:2004.

Para la implantación eficaz de un sistema de gestión ambiental es fundamental el firme compromiso de la alta dirección y la integración absoluta de la gestión medioambiental en las actividades de la compañía. Es por ello que el sistema de gestión ambiental de Metro fue diseñado teniendo en cuenta una perspectiva transversal, no departamental, concibiéndolo como parte integral de la actividad principal de Metro. Es un sistema muy sencillo, ágil y totalmente alineado con la Estrategia de la Compañía.

El sistema ha ido evolucionando desde entonces al ritmo de crecimiento de la compañía dando respuesta a las necesidades y expectativas de sus grupos de interés en cada momento, hasta conseguir la certificación en base a la nueva norma ISO 14001:2015 en el año 2017.

Así pues, los Objetivos Generales del Sistema han ido evolucionando, siendo en la actualidad prioritario no sólo la minimización del impacto, la optimización del uso de recursos, la mejora de los mecanismos del sistema y el impulso de la integración del sistema, sino también el fomento de los valores ambientales entre los proveedores, el fomento del desarrollo profesional y el refuerzo de la reputación e imagen responsable de Metro.

Los roles del sistema también han ido creciendo dando lugar, con el paso del tiempo, a figuras fundamentales al margen del Responsable del Sistema de Gestión y del Director del Sistema, como son los Responsables de Procesos y el Equipo Responsable del Sistema, y sustituyendo el antiguo Comité de Medio Ambiente por el Comité de Seguimiento Ambiental y por Grupos de Trabajo Interdepartamentales específicos en función de las necesidades del momento, haciendo partícipes de la toma de decisiones a todos los departamentos afectados.

También ha evolucionado la metodología empleada para la sensibilización y formación de empleados, y se ha ido ampliando de manera progresiva a otros grupos de interés como clientes, empresas contratistas y sociedad en general.

Conscientes de la importancia de la opinión de los diferentes grupos de interés se han ampliado los canales de comunicación internos y externos, implantando paulatinamente acciones derivadas de sus necesidades y expectativas, teniendo siempre presente el contexto en el que se desarrolla nuestra actividad y los riesgos ambientales.

Abstract

METRO MADRID ENVIRONMENTAL MANAGEMENT SYSTEM

All human activity entails a series of consequences for the environment and governments, companies and society play a vital role in limiting the damage and preserving resources.

Metro Madrid's concern for environmental conservation is not something recent, since the eighties actions have been carried out and investments made with a view to minimizing environmental impact.

Despite the difficulties that a company may face on account of size with regard to the number of employees and facilities, the geographical dispersion of the workplaces, the age of the facilities and the degree of outsourcing of activities, in 2005 Metro Madrid became the leader in its sector through being the first of the world's great metro networks to implement an Environmental Management System applicable to its whole activity and certified under standard ISO 14001:2004.

For the effective implementation of an environmental management system, crucial factors are the firm commitment of senior management and absolute integration of environmental management into the company's activities. This is why the Metro environmental management system was designed in accordance with a transversal, non-departmental perspective, planning it as an integral part of Metro's main activity. It is an extremely simple, dynamic system fully in line with the Company's strategy.

The system has gone on developing since then in pace with the Company's rate of growth so as to meet the needs and expectations of its interest groups at all times, until achieving certification on the basis of the new ISO 14001:2015 standard in 2017.

Accordingly, the General Aims of the System have gone on evolving, so that at the present time priority is placed not only on lowering impact, optimizing the use of resources, improving the mechanisms and spurring on the integration of the system, but also on fomenting environmental values amongst suppliers, encouraging professional development and boosting Metro's reputation and responsible image.

The roles of the system have also continued to grow, giving rise with the passage of time to new fundamental figures, alongside the Head of the Management System and the System Director, such as the Heads of the System Processes and Supervision Team, with the replacement of the former Environment Committee by the Environment Follow-up Committee and specific Interdepartmental Working Groups in accordance with current needs, assuring the participation in decision-making of all the departments affected.

The methodology used for awakening the awareness and training of employees has also been further developed and gradually extended to other groups of interest such as users, contractor companies and society in general.

Being fully aware of the importance of the opinion of the different groups of interest, we have broadened both internal and external channels of communication, with the gradual implementation of measures stemming from their needs and expectations, taking into consideration always the context in which our activity is carried on and its environmental risks.

Palabras clave: *compromiso; integración; estrategia; responsabilidad; desempeño ambiental; interdepartamental.*

Key words: *commitment; integration; strategy, responsibility; environmental performance; interdepartamental.*

Área temática: Ciclo de vida de la ciudad y sus construcciones

1. Introducción

Metro de Madrid S.A. es una empresa pública que está integrada en el Consorcio Regional de Transportes de Madrid, y cuya administración tutelar es la Comunidad de Madrid. Fue inaugurada en el año 1919 por el rey Alfonso XIII, y sus principales funciones son la explotación de las líneas de la red de Metro en funcionamiento, la planificación y mejora de la calidad del servicio de transporte y el mantenimiento y optimización de las instalaciones de la red del suburbano madrileño.

Metro de Madrid cuenta, en la actualidad, con cerca de 7.000 trabajadores y una red de 294 km y 301 estaciones, además de cocheras y recintos de mantenimiento distribuidos por toda la Comunidad, que permiten que 2 millones de personas cada día puedan realizar sus desplazamientos de la forma más cómoda, rápida y segura.

La preocupación de Metro de Madrid por el respeto ambiental no es algo reciente, puesto que desde los años 80 se vienen realizando acciones e inversiones para minimizar el impacto sobre el entorno, entre las que se encuentran la construcción de la depuradora de aguas industriales en los Talleres Centrales de Canillejas, la planificación e implantación de recicladoras de agua en los túneles de lavado y soplado de trenes y la construcción de puntos limpios intermedios y finales en los recintos de mantenimiento.

A pesar de las dificultades que puede suponer para una compañía la dimensión en cuanto a número de trabajadores y de instalaciones, la dispersión geográfica de los centros de trabajo, la antigüedad de las instalaciones y el grado de externalización de actividades, Metro de Madrid se convirtió en el año 2005 en líder en el sector al ser el primero de los grandes Metros del mundo en implantar un Sistema de Gestión Ambiental aplicable a toda su actividad y certificado bajo la norma ISO 14001:2004.

El sistema ha ido evolucionando desde entonces al ritmo de crecimiento de la compañía dando respuesta a las necesidades y expectativas de sus grupos de interés en cada momento, hasta conseguir la certificación en base a la nueva norma ISO 14001:2015 en octubre de 2017.

2. Objetivo

Implantación y mantenimiento de un Sistema de Gestión Ambiental en una compañía con las características de Metro de Madrid en cuanto a dimensión, dispersión geográfica de los centros de trabajo, antigüedad de las instalaciones y grado de externalización de actividades.

3. Metodología empleada y resultados

Para la implantación eficaz de un sistema de gestión ambiental es fundamental, en primera instancia, el firme compromiso de la alta dirección, así como el alineamiento con la estrategia en pro del respeto ambiental acompañado de la dotación de recursos humanos y materiales y, en segundo lugar, la integración absoluta y real de la gestión medioambiental en cada una de las actividades de la compañía, incluidas las desempeñadas por empresas contratadas.

Para velar por dicha integración, Metro de Madrid cuenta con un departamento de Medio Ambiente cuya misión es ser el equipo gestor que asesora, sensibiliza y busca soluciones eficientes para prevenir, controlar y minimizar los impactos ambientales de Metro de Madrid, contribuyendo a la protección del entorno.

3.1 Estrategia y diseño del sistema de gestión ambiental

Metro dispone, en la actualidad, de una estrategia a medio y largo plazo que se estructura en los siguientes Pilares Estratégicos:

- Servicio público: concepto fundamental en Metro de Madrid como empresa pública de transporte y vertebradora de la movilidad en la región y que gira alrededor de la mejora continua de la prestación del servicio a sus clientes, manteniéndose el foco en la recuperación de la demanda.
- Eficiencia: la eficiencia implica la obligación como empresa pública de ofrecer un servicio de calidad a un coste razonable teniendo en cuenta la variable económica. La eficiencia persigue la necesaria sostenibilidad económica de la empresa y la sostenibilidad ambiental y social.
- Experiencia de cliente: Metro de Madrid, además de garantizar la movilidad de los ciudadanos, debe garantizar una buena experiencia de viaje poniendo el foco en que la imagen de Metro siga mejorando entre sus clientes y la sociedad en general.

La estrategia medioambiental se detalla en una política ambiental que recoge los compromisos de la alta dirección y está a disposición del público interesado, y se despliega en los siguientes Objetivos Generales del Sistema de Gestión:

- Minimizar el impacto medioambiental, es decir, valorar y fomentar la aplicación de criterios ambientales en el ciclo de vida de los productos y en el desarrollo de la actividad diaria.
- Optimizar el uso de los recursos, esto es, optimizar la utilización de las principales materias primas necesarias para el desarrollo de la actividad.
- Mejorar los mecanismos del sistema de gestión ambiental, es decir, impulsar mecanismos que mejoren la calidad de la información y aumenten el conocimiento del comportamiento ambiental de Metro.
- Impulsar la integración de la gestión ambiental en la actividad diaria de Metro, en colaboración con todas las unidades organizativas.
- Fomentar los valores medioambientales en relación con la cadena de proveedores, es decir, transmitir los valores de Metro a sus proveedores y la necesidad de aplicar criterios medioambientales en su actuación.
- Fomentar el desarrollo profesional, la colaboración y el compromiso ambiental de los empleados de Metro, es decir, definir y comunicar las líneas de actuación que

aumenten el conocimiento técnico y el desarrollo personal de los empleados de Metro, fomentando el compromiso ambiental, la colaboración y la participación.

- Contribuir desde la vertiente ambiental a reforzar la reputación e imagen responsable de Metro, lo que significa trasladar y comunicar iniciativas de valor ambiental para la sociedad, las administraciones tutelares y otros grupos de interés.

Dichos objetivos generales se concretan en objetivos anuales que contribuyen a la estrategia de Metro. Los objetivos anuales se priorizan teniendo en cuenta los riesgos y oportunidades derivados del contexto de la organización, de las necesidades y expectativas de los grupos de interés, de los aspectos y requisitos ambientales, y de los más de 100 indicadores existentes. Estos indicadores abarcan desde aquellos que miden el impacto ambiental de los flujos de entrada y de salida, a otros que proporcionan información sobre la efectividad de los procesos y cumplimiento de objetivos/acciones, como se muestra en la figura 1.

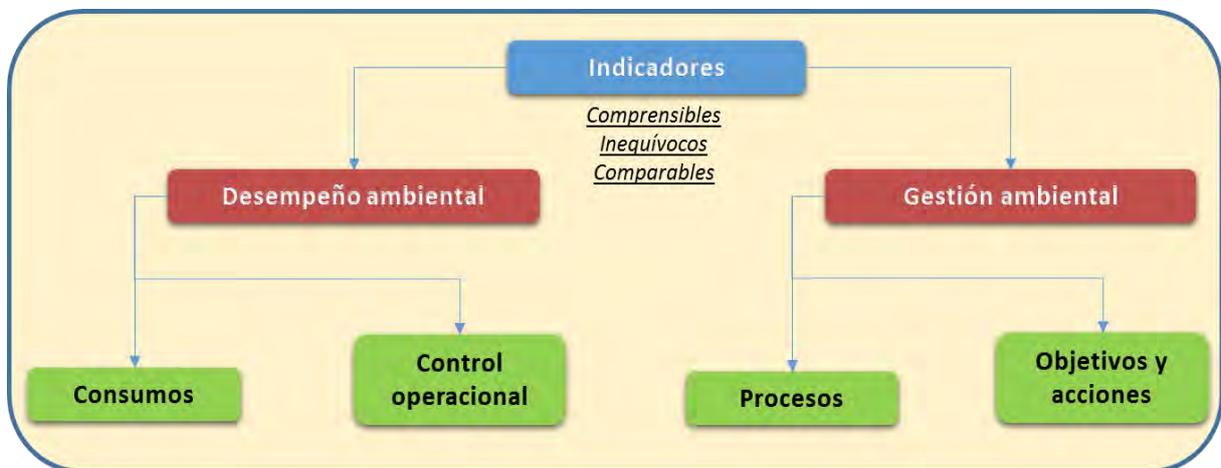


Figura 1: Clasificación de indicadores

Metro de Madrid desarrolla e implementa su política y objetivos ambientales, gestiona sus aspectos ambientales, asegura el cumplimiento de los requisitos legales y aborda sus riesgos y oportunidades de carácter ambiental a través de un Sistema de Gestión.

El Sistema de Gestión de Metro está constituido por una serie de documentos (manual, procesos e instrucciones) que fueron diseñados, desde el primer momento, teniendo en cuenta una perspectiva transversal, no departamental, lo que supone una de las claves del sistema al no concebirlo como algo ajeno a la actividad principal de Metro.

Se trata de un sistema muy sencillo para que sea fácilmente comprensible por todos los interesados, ágil, adaptable a las circunstancias cambiantes y que se encuentra totalmente alineado con la estrategia.

3.2 Roles del Sistema y su evolución

En sus comienzos y con el fin de integrar el respeto medioambiental en la cultura empresarial, existía la figura del Responsable del Sistema de Gestión y la figura del Director del Sistema: el Responsable del Sistema de Gestión como figura encargada de diseñar, implementar y

mantener la documentación del sistema y suministrar información ascendente, y el Director del Sistema como representante dentro del Consejo de Dirección, asumiendo labores de información sobre la evolución del sistema.

Además, existía el Comité de Medio Ambiente, que estaba formado por un representante de cada Dirección de Metro con responsabilidad en el Sistema, el responsable del departamento de Medio Ambiente y el Responsable del Sistema. Su principal cometido consistía en realizar un seguimiento periódico del Sistema e implantar las acciones oportunas para la mejora continua. Para ello, se celebraban reuniones periódicas, en las que se revisaba el grado de cumplimiento de objetivos y metas, las comunicaciones de partes interesadas, el estado de las no conformidades y acciones correctivas, la evolución y evaluación de los requisitos ambientales, los resultados de auditorías internas y externas, el desempeño ambiental de la organización, y el seguimiento de las acciones resultantes de las revisiones previas derivadas de la Revisión por la Dirección.

Cuando se determinó que el sistema contaba ya con cierta madurez y basándonos en el modelo EFQM, se produjo un cambio en la metodología incorporando más roles en el sistema al margen de los ya existentes (Director del Sistema y Responsable del Sistema de Gestión), como se puede ver en la figura 2.

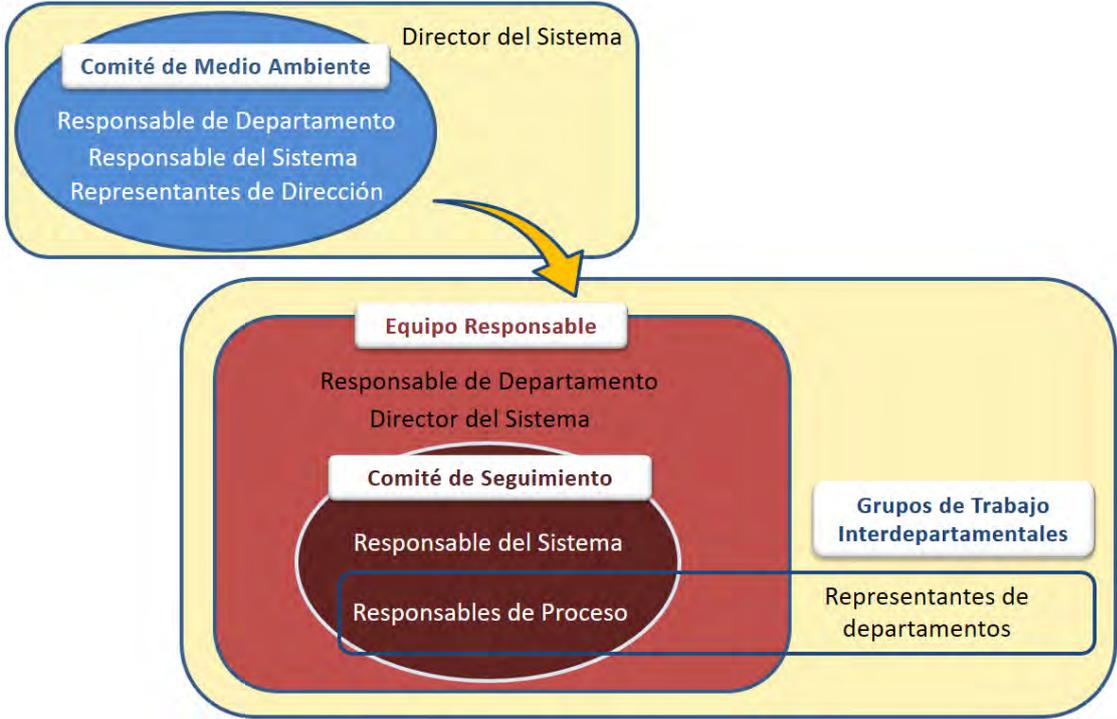


Figura 2: Evolución de Roles

Se crea una figura por cada proceso, llamada "Responsable de Proceso". El Responsable de Proceso debe asegurar que el proceso del que es responsable cumpla con su finalidad. Asume la responsabilidad del mismo en su conjunto, al margen del número de departamentos que intervengan, puesto que la concepción de los procesos es transversal. Cuenta con la autoridad y conocimientos necesarios para coordinar los recursos asociados al mismo,

resuelve conflictos internos del proceso, aprueba cambios, y reporta directamente al Responsable de Sistema.

Lo más complicado de un sistema de gestión de estas características es gestionar la interrelación y horizontalidad de las actividades, en las que intervienen tantos departamentos, puesto que es el principal origen de conflictos en la toma de decisiones. Es por ello que el Responsable de Proceso convoca reuniones interdepartamentales con el respaldo de la Dirección cuando lo considera necesario e incluso, si lo estima conveniente, crea Grupos de Trabajo Interdepartamentales en los que se fomenta la comunicación bidireccional, escucha activa y, por lo tanto, la motivación para garantizar el buen funcionamiento del proceso.

Un ejemplo claro de grupo de trabajo interdepartamental en Metro es el Grupo de Trabajo de Seguimiento de Proyectos y Obras, que surgió en el año 2013 con el fin de garantizar el cumplimiento del proceso interno "Gestión Ambiental de Empresas Contratadas". Este grupo de trabajo está formado por representantes de todos los departamentos de Metro que realizan obras y por la Responsable de Proceso.

Gran parte de las obras de Metro son desempeñadas por empresas externas, lo que dificulta enormemente la supervisión ambiental de las mismas más allá del mero cumplimiento de la normativa vigente. Gracias a este grupo de trabajo, se garantiza la inclusión de criterios ambientales y la supervisión documental de todos los proyectos y obras con repercusión ambiental, así como la inspección ambiental in situ con recursos propios de al menos el 80% de las mismas. Además, se consigue la integración real de la gestión ambiental en una actividad de tanta relevancia ambiental como es el control de obras de mantenimiento y renovación al sentirse los responsables de estos trabajos como parte de un equipo.

Por otra parte, se crea el Equipo Responsable del Sistema, que es un órgano formado por el Director del Sistema, Responsable de Departamento, Responsable del Sistema y Responsables de Proceso. Se encarga de la definición y/o revisión de la Misión, Visión, Valores y Objetivos del Sistema de Gestión, y de su despliegue en objetivos anuales, planes de acción e indicadores y de analizar los posibles cambios en el contexto de la organización, necesidades y expectativas de partes interesadas, sus aspectos ambientales significativos y los riesgos y oportunidades. Además, revisa periódicamente el desempeño ambiental de la organización, la adecuación de los recursos, las comunicaciones con partes interesadas y las oportunidades de mejora. La finalidad es asegurar la adecuación y eficacia del sistema, y tomar las decisiones necesarias para garantizar la mejora continua.

El antiguo Comité de Medio Ambiente se sustituye por el Comité de Seguimiento, que está constituido por los responsables de los diferentes procesos y por el Responsable del Sistema. Con una periodicidad trimestral, se reúne para analizar el buen funcionamiento de los procesos, para hacer un seguimiento pormenorizado de los indicadores clave del sistema, entendiendo estos indicadores como una herramienta de mejora más que de un mero control, y para resolver conflictos que puedan haberse detectado en las salidas o entradas de procesos consecutivos.

Para que un sistema funcione adecuadamente, cada uno de estos roles deben ser ocupados por personas que se caractericen, en la medida de lo posible, por su compromiso y conciencia ambiental, habilidades para el trabajo en equipo, proactividad, dinamismo y coherencia.

3.3 Identificación, evaluación, control y seguimiento de aspectos ambientales. Objetivos ambientales

El punto de partida de todo sistema de gestión ambiental es conocer en profundidad las diferentes actividades desempeñadas y en qué grado interactúan o impactan en el entorno.

“Se pueden considerar los aspectos ambientales como las causas y los impactos ambientales como los efectos sobre el medio ambiente” (AENOR 2016, Guía para la aplicación de UNE-EN-ISO 14.001:2015).

Una vez identificados los aspectos, se procede a su evaluación en base a criterios objetivos con la finalidad de establecer prioridades de actuación. Esta identificación y evaluación no es permanente, sino que ha de revisarse periódicamente.

En el caso de Metro contamos con más de 200 aspectos ambientales agrupados en consumos, emisiones atmosféricas, vertidos, generación de residuos, ruidos y vibraciones, afección al suelo y situaciones de emergencia. Estos aspectos se identifican de manera continua y se evalúan, como mínimo, con periodicidad anual por parte del Equipo Responsable del Sistema. Para la evaluación se tienen en cuenta la magnitud, la peligrosidad y su evolución respecto al año anterior (ratio). La evaluación se nutre de datos objetivos, que se obtienen bien de las campañas periódicas de control y medición de aspectos, bien en base a lectura de contadores y facturas, o bien en base a registros de mantenimiento o documentación de carácter ambiental. Es el Responsable del Proceso quien se encarga de recabar esta información contactando con los departamentos responsables y demás Responsables de Procesos, y quien se encarga de su ponderación, obteniendo cada uno de los aspectos una puntuación.

En el caso de Metro son considerados como significativos el 5% de los aspectos que más puntuación han obtenido y, en caso de empate en el límite de corte, se consideran todos los aspectos empatados como significativos. Todos ellos se comunican y se investigan junto con los departamentos implicados para encontrar una justificación. Con el paso del tiempo, y en línea de la mejora continua, se decidió no sólo investigar aquéllos que resultan significativos, sino también los que tienen una puntuación inmediatamente inferior y aquéllos que hayan visto incrementado su ratio en más de un 150%.

Esta información, junto con la que deriva de la identificación y análisis de riesgos, servirán de base para el establecimiento de objetivos anuales y/o planes de acción.

En ocasiones se establecen objetivos o planes de acción, que dan respuesta a diferentes análisis de información realizados de forma paralela, lo que demuestra la congruencia del sistema, como los relativos al consumo de energía eléctrica (englobados en el Plan de Ahorro Energético, o PAE) y consumo de agua. Así pues, por ejemplo, la adaptación del sistema de programación de riego del depósito de Canillejas que se realizó en 2017 dio respuesta al análisis de riesgos realizado de las necesidades y expectativas de grupos de interés, a la evaluación y análisis de riesgos y oportunidades de aspectos ambientales y al análisis del contexto de la organización. A su vez, este objetivo, reporta directamente al Objetivo General del Sistema “Optimizar el uso de los recursos” y al Objetivo Estratégico “Impulsar la eficiencia de los procesos clave”.

Dicho objetivo consistió en la sustitución de los elementos de riego existentes por un novedoso sistema programable mediante control remoto, de modo que mediante un software informático todas las zonas de riego se pueden dirigir desde cualquier ordenador con conexión a internet. También se ha instalado un sensor de lluvia que incorpora un pluviómetro que elimina automáticamente el riego en días lluviosos. Además del ahorro de tiempos conseguido al reducir los desplazamientos del personal de jardinería, se estima que, gracias a la instalación de estos sistemas, el ahorro anual de agua es de 3.745 m³, lo que supone aproximadamente un 6% del total del consumo del recinto de Canillejas. Esto se traduce en el consumo de agua aproximado de más de 100 personas durante todo un año.

Ya no sólo se trata de minimizar el impacto, sino de proteger en el entorno. Así pues, Metro de Madrid implanta objetivos y acciones en esta línea, como puede ser la plantación de 50 nuevos árboles al año en sus instalaciones y el refuerzo del servicio en días de restricciones.

de tráfico por la aplicación del Protocolo para episodios de alta contaminación del Ayuntamiento de Madrid en aras de contrarrestar y evitar emisiones de gases a la atmósfera.

3.4 Cumplimiento de requisitos legales y otros requisitos suscritos

Para una organización comprometida con el medio ambiente es fundamental establecer metodologías adecuadas para asegurar el cumplimiento de la legislación ambiental y la de aquellos requisitos que voluntariamente se compromete a cumplir. Para determinar la legislación de aplicación es fundamental conocer de qué manera las actividades de la empresa interaccionan con el entorno.

Aunque Metro reporta claros beneficios ambientales a la sociedad al desplazar otros medios de transporte y reducir congestiones de tráfico, ruido y contaminación asociada, la prestación de servicio y actividades soporte exigen el cumplimiento de muchos requisitos, unos legales de obligado cumplimiento y otros voluntarios adquiridos mediante la firma de convenios o elaboración de políticas.

Para garantizar la identificación y cumplimiento de estos requisitos Metro cuenta con un proceso específico denominado “Identificación y evaluación de requisitos ambientales” en el que se recoge la metodología empleada.

Por una parte, se dispone de un Catálogo de Requisitos Ambientales en el que se detalla la legislación ambiental aplicable analizada de manera exhaustiva, artículo por artículo, y agrupada por aspecto ambiental. Este catálogo no es estático, sino que se actualiza continuamente por el Responsable de Proceso, que accede periódicamente a publicaciones oficiales de legislación y otras especializadas en materia de medio ambiente y, además, cuenta con el apoyo de servicios externos contratados expertos en legislación ambiental y con el apoyo del departamento jurídico de la empresa. Asimismo, dispone de un refuerzo adicional al incluir en los pliegos de contratación de trabajos de carácter ambiental la obligación de que los adjudicatarios mantengan a Metro informado de cualquier novedad legislativa relativa al alcance del contrato que pueda aprobarse en el transcurso de los trabajos.

Una vez identificada la nueva normativa aplicable, se modifica el catálogo y se hace llegar los nuevos requisitos a los departamentos afectados para asegurar que son conocedores de las novedades y se celebran las reuniones de asistencia y asesoramiento ambiental que sean solicitadas por estos. Posteriormente, cada responsable de departamento se encarga de trasladar la información a su equipo y de promover las medidas oportunas para asegurar su cumplimiento en el plazo establecido.

Por otra parte, con carácter semestral se realiza una evaluación de cumplimiento de requisitos. Para ello, se han diseñado unas plantillas específicas para cada departamento con los requisitos ambientales aplicables a su actividad en particular, en las que se aprecian, además, los resultados de la evaluación anterior. Cada departamento los devuelve en un plazo estipulado actualizando su cumplimiento, indicando si está cumplido o en proceso. En este último caso, se procede a la apertura de la correspondiente observación o no conformidad para proceder al seguimiento específico y en continuo de los mismos. La información recogida en estas plantillas es analizada por el Responsable de Proceso, el Responsable de Sistema y, anualmente, por el Equipo Responsable del Sistema formando parte de la Revisión por la Dirección y, por lo tanto, teniéndose en consideración para la toma de decisiones.

Metro de Madrid no sólo vela por el cumplimiento de los requisitos ambientales en las actividades desempeñadas por sus empleados, sino también por parte de las empresas contratadas. Así pues, desde hace años se viene realizando un importante esfuerzo por la difusión de los requerimientos legales entre las empresas, y por incrementar en cantidad y

exigencia de las inspecciones ambientales in situ. A lo largo de 2017, al margen de la comprobación del cumplimiento de la legislación aplicable, se ha hecho especial hincapié en el control de consumo de recursos en la ejecución de obras.

3.5 Sensibilización ambiental: la importancia de la implicación y colaboración de los empleados, contratistas y de la sociedad en general

La implicación, colaboración y sensibilización de los empleados es fundamental para garantizar la protección del entorno, más si cabe en una empresa como Metro que cuenta con un capital humano tan elevado.

Desde la implantación del sistema en el año 2005, se han utilizado diferentes metodologías de formación y sensibilización en función de las necesidades y expectativas y de los recursos disponibles en cada momento, como puede ser el envío de información ambiental por correo postal, publicación de memorias ambientales, colocación de carteles en lugares de trabajo, publicaciones en la intranet, sesiones formativas on-line y presenciales de carácter global y/o departamental, utilización de espacios en boletines de distribución interna y pantallas informativas, elaboración de manuales específicos, etc. e incluso se ha puesto a disposición de los empleados sesiones formativas voluntarias consistentes en visitas a plantas de tratamiento de residuos para que comprueben en primera persona la relevancia de la segregación en origen.

Actualmente se están impartiendo sesiones presenciales de formación y sensibilización específica dirigidas a las nuevas incorporaciones, incluyendo maquinistas de tracción eléctrica, jefes de sector y ayudantes de oficio. La finalidad es dar a conocer, desde la primera toma de contacto, las actuaciones de Metro en materia de gestión ambiental, los canales de participación existentes animando a su utilización y la importancia de la colaboración de cada uno de los empleados para la reducción del impacto. En estas charlas se hace entrega de un decálogo ambiental, que recoge buenas prácticas aplicables tanto en el puesto de trabajo como en casa.

Pero Metro quiere ir más allá y rebasar los límites de la organización en cuanto a concienciación y sensibilización se refiere. Es por ello que, desde hace años, Metro ofrece la posibilidad de concertar visitas a cursos, colegios y universidades de todo el mundo en las que se muestran las principales actuaciones e instalaciones de carácter ambiental, además de participar en eventos como la Semana de la Ciencia, que se celebra anualmente, a los que puede asistir gratuitamente el público interesado.

Conscientes de la importancia de sensibilizar e inculcar los valores ambientales desde la más tierna infancia, en los últimos años se están ofreciendo una actividad de carácter ambiental por el Día Internacional de los Bosques dirigidas a hijos y nietos de empleados, que está teniendo mucho éxito. La actividad consiste en la realización talleres de manualidades con materiales reciclados y un paseo didáctico por uno de los recintos de mantenimiento en los que pueden comprobar cómo Metro separa sus residuos y se les muestran las más de diez especies diferentes de árboles que allí existen explicándoles sus principales características. La actividad culmina con la plantación de árboles en la que los niños son los protagonistas.

Esta labor de sensibilización la extendemos en la medida de lo posible entre nuestros proveedores y contratistas con más incidencia ambiental, haciéndoles llegar, al margen de la normativa ambiental, procesos, etc. de obligado cumplimiento en nuestras instalaciones, manuales de buenas prácticas ambientales con el objetivo de sensibilizar y promover un consumo responsable de los recursos, así como una gestión adecuada de los residuos que generan.

3.6 Comunicación ambiental: la importancia de tener en cuenta la opinión de los grupos de interés

En los inicios del sistema, se establecieron ciertos canales internos de comunicación tanto ascendentes como descendentes. Para la comunicación ascendente de empleados existía un registro que debían cumplimentar, hacer llegar a su responsable directo para su aprobación y posteriormente enviar al equipo del sistema, el cual daba respuesta completando este mismo registro. Con el paso del tiempo, se han ido habilitando canales más ágiles, de modo que cualquier trabajador puede enviar sugerencias, quejas y reclamaciones de forma directa y al instante utilizando dos buzones habilitados para tal fin: uno general disponible en la intranet de la empresa, donde se reciben y distribuyen comunicaciones de cualquier índole, y uno específico de Medio Ambiente. Todas las sugerencias que se recogen a través de estos medios son analizadas, implantando aquéllas que se considera oportuno. Así pues, a raíz de sugerencias de empleados, de los 150 vehículos que constituyen la flota para los desplazamientos de personal y/o materiales/herramientas hay 12 eléctricos, actualmente en fase de pruebas. En toda la flota se han instalado dispositivos de localización para optimizar el número de vehículos necesarios, y para estudiar la viabilidad del desarrollo de nuevos proyectos como, por ejemplo, el uso compartido de vehículos o la ampliación de la flota de vehículos eléctricos e instalación de postes de recarga adicionales.

Por otra parte, y al evolucionar las necesidades de los departamentos e incrementar las peticiones de información, se creó un proceso específico de “Asistencia y asesoramiento ambiental”. En este proceso se recoge la metodología para tramitar dichas asistencias, estableciendo una serie de indicadores, un plazo máximo de respuesta que se respeta en el 100% de los casos y la necesidad de guardar registro de todas ellas.

Dentro de este proceso no sólo se tienen en cuenta las asistencias internas, sino también las solicitudes de información y asistencia por parte de entidades externas como administraciones españolas y extranjeras competentes en materia de gestión ambiental, foros, universidades, etc. incluidas las colaboraciones en materia de gestión ambiental con Metros de todo el mundo.

Todas las sugerencias, quejas y reclamaciones medioambientales externas que llegan a Metro por los diferentes canales establecidos eran, en sus inicios, tramitadas por el departamento encargado de la gestión de todas las comunicaciones externas, que recababa la información necesaria de los departamentos afectados para elaborar las respuestas.

Con el paso del tiempo y para lograr la máxima eficacia, la Dirección tomó la decisión de que todas las reclamaciones recibidas por ruidos y vibraciones fueran tramitadas por un departamento adicional, experto en el tema y gestor directo de alrededor del 60% de las mismas, que las estudia, analiza y tramita de manera independiente. Esta metodología garantiza que la información recabada se tenga muy presente en la programación de trabajos de revisiones continuas del desgaste ondulatorio de las vías así como a la hora de priorizar obras de renovación y mejora de vías y pozos de ventilación. En la actualidad y como ejemplo de un paso firme en pro de la mejora continua, se realizan estudios preventivos de nivel sonoro para obtener conocimiento pormenorizado de las zonas más sensibles.

Por último, Metro también realiza un esfuerzo para comunicar externamente el desempeño ambiental de la empresa, como la publicación del Informe Anual de Gestión y RC, y para aportar su granito de arena para la sensibilización de los clientes y de la sociedad en general; tal es el caso de diversas campañas divulgativas de cartelería que se han realizado a lo largo de los años en las estaciones y trenes de manera individual o en colaboración con diferentes asociaciones, exposiciones en estaciones con temática ambiental, etc.

A raíz del análisis de necesidades y expectativas de proveedores y contratistas, y de las necesidades y expectativas de la sociedad cada vez más exigente desde el punto de vista

ambiental, y en línea con sugerencias recibidas, se están llevando a cabo actualmente varias acciones adicionales:

Por una parte, en los contratos se están estableciendo, de manera progresiva, cláusulas ambientales más estrictas de obligado cumplimiento. Tal es el caso del contrato de gestión integral de residuos, en el que se han incrementado las exigencias relativas a la optimización de transportes en aras de minimizar tiempos y emisiones a la atmósfera y las relativas al tratamiento de residuos, minimizando el impacto ambiental derivado de la generación de residuos. Asimismo, se está exigiendo el empleo de turismos y furgonetas ligeras respetuosas con el medio ambiente para prestar el servicio. Gracias a ello, más del 95% de las toneladas de Metro han sido gestionadas dentro de la Comunidad de Madrid, con el consiguiente ahorro de emisiones a la atmósfera derivados de las operaciones de transporte, y más del 95% han sido valorizadas. Además, cerca del 60% de los residuos de envases contaminados se han recuperado y reincorporado al ciclo productivo, aumentando su ciclo de vida.

Por otra parte, a raíz de la aplicación de la nueva norma ISO 14.001:2015, se ha establecido un plan de acción dirigido a fomentar la implantación de proyectos ambientalmente novedosos. En esta línea, en la actualidad se está ejecutando un proyecto piloto de aplicación de recubrimientos fotocatalíticos en uno de nuestros recintos.

Estas acciones van en línea con uno de los compromisos ambientales de Metro recogidos en su política ambiental que consiste en fomentar los valores ambientales en relación con la cadena de proveedores.

4. Conclusiones

Para la implantación eficaz de un sistema de gestión ambiental es fundamental el firme compromiso de la alta dirección, el alineamiento con la estrategia y la integración de la gestión ambiental en cada una de las actividades de la compañía.

El sistema tiene que ser ágil, comprensible y adaptable, facilitar el conocimiento del comportamiento ambiental de la empresa y proporcionar información valiosa para la toma de decisiones.

El Sistema de Gestión Ambiental de Metro de Madrid ha ido evolucionando y adaptándose a las circunstancias cambiantes, innovando en la gestión e implantación de diferentes metodologías en función del contexto y necesidades y expectativas de los grupos de interés (ver figura 3), consiguiendo, no sólo ser el primero de los grandes metros del mundo en implantar un sistema de gestión ambiental aplicable a toda su actividad, sino consiguiendo que se mantenga de manera exitosa y útil para la gestión empresarial hasta la actualidad.



Figura 3: Evolución del Sistema de Gestión Ambiental

Referencias

AENOR 2004, Sistemas de gestión ambiental. Requisitos con orientación para su uso (ISO 14.001:2004).

AENOR 2010, Gestión ambiental. Comunicación ambiental. Directrices y ejemplos (ISO 14063:2006).

AENOR 2015, Sistemas de gestión ambiental. Requisitos con orientación para su uso (ISO 14.001:2015).

AENOR 2015, Gestión ambiental. Evaluación del desempeño ambiental. Directrices (ISO 14.031:2015)

AENOR 2016, Guía para la aplicación de UNE-EN-ISO 14.001:2015

Valdés Fernández, José Luis, Revista AENOR nº 307 (sept. 2015): artículo “El Medio ambiente gana peso”

Correspondencias (Para más información contacte con)

Nombre y apellido: Carmen Cordovilla

Teléfono: 91 379 88 00

Fax: 91 379 14 62

E-mail: Medio_Ambiente@metromadrid.es

Cesión de derechos

Por la presente, y como autor del trabajo mencionado arriba, cedo al Palacio de Ferias y Congresos de Málaga una licencia no-exclusiva irrevocable para imprimir, reproducir, distribuir, transmitir o comunicar de cualquier manera dicho trabajo, incluyendo el derecho de hacer modificaciones de formato. Además, afirmo que esta cesión no lesiona los derechos de terceros.



Carmen Díaz

Universidad de Granada

Manuel Carpio

Universidad Católica de Chile

María Martín

Universidad de Granada

Montserrat Zamorano

Universidad de Granada

CATÁLOGO DE METODOLOGÍAS PARA LA EVALUACIÓN DE EDIFICACIÓN SOSTENIBLE

Resumen

La insostenibilidad del modelo actual de producción-consumo, unido a una creciente demanda de energía en todo el mundo ha derivado en un importante incremento de los impactos ambientales, como producción de residuos, contaminación de aguas, agotamiento de la capa de ozono y acidificación, junto al agotamiento de los recursos naturales y efectos sobre el clima, entre otros.

Una de los principales sectores de aceleración del cambio climático y el agotamiento de recursos naturales es la industria de la construcción, que causa una importante carga ambiental a lo largo de su ciclo de vida (ACV) y que varía considerablemente en función del tipo de edificio y su ubicación. Toda esta problemática ha llevado a autoridades, organizaciones, profesionales y ciudadanos, a apostar por una industria de la construcción sostenible, con la finalidad de abordar los problemas ambientales y de salud que surgen de los edificios, reducir los impactos del sector en el medio ambiente natural, así como en las personas y las huellas ambientales del entorno construido; bajo las tres dimensiones, ambiental, social y económica, que constituyen el marco de referencia de la filosofía del desarrollo sostenible.

En los últimos años se ha multiplicado exponencialmente el desarrollo de metodologías que permiten la evaluación de los edificios desde el punto de vista ambiental. Estos métodos podrían clasificarse en tres grandes grupos atendiendo a sus características, esquemas y objetivos comunes: sistemas de evaluación; estándares, y herramientas de evaluación ambiental; así como Level(s), el primer instrumento de este tipo desarrollado para su uso en toda Europa que permitirá establecer un nuevo marco de la UE para la sostenibilidad de los edificios.

En consecuencia, el objetivo de este trabajo es la clasificación de las diferentes metodologías en tipologías o grupos, así como la redacción de un catálogo de las mismas. En este análisis se incluirá, además, la metodología más reciente, Level(s), no estudiada hasta el momento, lo que permitirá estudiar y graduar los diferentes impactos ambientales en los que se centran cada uno de estos grupos de metodologías y Level(s).

Abstract

The unsustainability of the current production-consumption model, together with a growing demand for energy throughout the world, has led to a significant increase in environmental impacts, such as waste production, water pollution, depletion of the ozone layer and acidification, along with the depletion of natural resources and effects on the climate, among other issues.

One of the main sectors accelerating climate change and depleting natural resources is the construction industry, which creates a significant environmental burden throughout its life cycle (LCA) although it varies considerably depending on the type of building and its location. All these problems have led authorities, organisations, professionals and citizens, to opt for a sustainable construction industry, in order to address the environmental and health issues arising from buildings. They also hope to reduce the impact of the sector on the natural environment, as well as on people and the environmental footprints of the building world; under these three dimensions: environmental, social and economic, these constitute the reference framework for the philosophy of sustainable development.

In recent years, the development of methodologies permitting buildings to be evaluated from an environmental point of view, has multiplied exponentially. These methods can be classified into three large groups according to their characteristics, schemes and common objectives: evaluation systems; standards; and environmental assessment tools; so like, Level(s), the first such instrument developed for use throughout Europe. It will establish a new EU framework for the sustainability of buildings.

Consequently, the goal of this work is to classify the different methodologies in typologies or groups, as well as to create a catalogue of these methodologies. This analysis will also include the most recent methodology, Level(s), which has not been studied yet. This will allow for studying and grading of the different environmental impacts that each of these methodology groups and Level(s) focus on.

Palabras clave

Sostenibilidad; metodologías de evaluación; sistemas de evaluación; estándares de evaluación; herramientas de evaluación; Level(s)

Área temática:

Actuaciones sostenibles en la edificación.

Diseño sostenible de los edificios. Equipamiento eficiente en búsqueda de la reducción del impacto ambiental, social y/o económico.

1. Introducción

Los edificios y su entorno conllevan asociado un enorme consumo de recursos, agua y otras materias primas, tanto en su espacio más inmediato como en el conjunto de la urbe, desde el momento de su diseño, así como durante su vida útil hasta su fin como elemento funcional. En consecuencia, uno de los principales sectores de aceleración del cambio climático y el agotamiento de recursos naturales es la industria de la construcción, que causa una importante carga ambiental a lo largo de su vida útil, desde su construcción, hasta su demolición, pasando por la fase de uso, y que varía considerablemente en función del tipo de edificio y su ubicación (de Klijn-Chevalerias & Javed, 2017)(Sandanayake, Zhang, & Setunge, 2018). De esta forma, la creciente edificación de las áreas urbanas provoca un impacto significativo en el medio ambiente, la economía, la salud pública (Darko, Chan, Ameyaw, He,

& Olanipekun, 2017) y el bienestar en las ciudades (Macías & García Navarro, 2010); este sector económico es responsable del 40-50% de todo el uso de energía, que ha duplicado su consumo entre 1973-2012 (Carpio, 2015), además de incrementar las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero (Miller, Doh, Panuwatwanich, & Van Oers, 2015)(Blankendaal, Schuur, & Voordijk, 2014)(Hamdy, Carlucci, Hoes, & Hensen, 2017), consumir el 30% de materias primas, el 25% del agua global (Giannetti, Demétrio, Agostinho, Almeida, & Liu, 2018) y el 17% de las extracciones mundiales de agua dulce (Dixit, Culp, & Fernández-Solís, 2013) ; 12% del suelo (Dong & Ng, 2015), y generar el 25% de los residuos sólidos a nivel mundial y el 40% de residuos sólidos en los países desarrollados (Yilmaz & Bakış, 2015). Estos datos ponen de manifiesto la especial responsabilidad en el deterioro del medio ambiente resultante. Los efectos del cambio climático, y la escasez de recursos, entre otros, está dando lugar a una mayor concienciación, tanto de los ciudadanos como de los proyectistas, de los problemas medioambientales generados por la edificación. Como resultado, en los últimos años, se ha desarrollado el concepto de construcción o edificación sostenible, que ha incorporado progresivamente nuevas ideas y matices.

La edificación sostenible ha crecido a partir del movimiento hacia la edificación verde y bajo el movimiento más amplio de desarrollo sostenible. Este cambio de mentalidad ha surgido durante los últimos 30-40 años con una clara evolución histórica. El movimiento verde y el concepto de edificio verde o ecológico se inicia en los años 70 con especial énfasis en la conservación de la energía y la eficiencia energética; un movimiento sensible a la inquietud sobre el agotamiento y deterioro de los recursos naturales de energía debido al uso inadecuado y excesivo que se está haciendo de ellos, y comienza entonces la investigación sobre modelos de conservación de la misma con base en alcanzar tecnologías con rendimientos energéticos más eficientes (Greencities & Sostenibilidad, 2012). Posteriormente, en los años 80 crece la preocupación acerca del impacto que produce la operación del edificio y la fabricación de los materiales de construcción sobre el medioambiente natural (García y Macías, 2010). Pero, además de los efectos que las edificaciones producen en el medio, no se debe olvidar que los edificios son los espacios en los que la población pasa la mayor parte de su tiempo, por lo que un diseño pobre e inadecuado puede tener efectos negativos significativos en la salud de los edificios y de sus ocupantes, dando lugar, además, a edificios caros de mantener en los que difícilmente se alcanza el confort térmico y con claros efectos negativos sobre el modo de vida de la población; la pobre calidad del aire interior y la inadecuada ventilación en estos espacios cerrados dan lugar al síndrome del edificio enfermo (SEE), definido como el conjunto de enfermedades originadas o estimuladas por la contaminación del aire en estos espacios herméticos (OMS, 1982).

La edificación sostenible es, por tanto, un proceso en que todos los actores implicados (propiedad, proyectistas, constructores, equipo facultativo, suministradores de materiales, administración, etc.) integran las consideraciones funcionales, económicas, ambientales y de calidad para producir y renovar los edificios y su entorno. Es el desarrollo de la construcción tradicional pero con una responsabilidad considerable con el Medio Ambiente por todas las partes y participantes; implica un interés creciente en todas las etapas de la construcción, considerando las diferentes alternativas en el proceso de construcción, en favor de la minimización del agotamiento de los recursos, previniendo la degradación ambiental o los prejuicios, y proporcionando un ambiente saludable, tanto en el interior de los edificios como en su entorno (Alavedra, Domínguez, Gonzalo, & Serra, J. , 49(451), 1997).

A principio de los años 90 surgen los primeros sistemas de evaluación de la sostenibilidad de las edificaciones, centrándose principalmente en el parámetro ambiental. Estos sistemas agrupaban las distintas corrientes existentes y proponían una serie de actuaciones con el fin de buscar una sostenibilidad ambiental conjunta a todo el edificio (es decir, un compromiso de reducción de los impactos ambientales de la edificación a lo largo de todo su ciclo de vida (IHOBE, s.f). Gradualmente ha habido un incremento en el consenso en relación con el tipo

impactos que deben incluirse en un modelo de evaluación ambiental, que se ha traducido, especialmente ya en el siglo XXI, en la búsqueda de herramientas y actuaciones destinadas al desarrollo de una metodología común que evalúe las prestaciones, a nivel integral, referentes a la sostenibilidad de los edificios y del proceso de edificación, incluyendo en esta evaluación la consideración de la totalidad de su ciclo de vida (Core Concepts and LEED Guide, s.f). Esta evaluación permite optimizar los edificios desde etapas muy tempranas, desde su fase de diseño, lo que permitirá tomar decisiones correctas no sólo en su construcción, sino también en su fase de uso y operaciones de rehabilitación y mejora, que tendrán una repercusión en su consumo energético, la calidad de aire interior, la reciclabilidad y la reutilización de los residuos de demolición, en definitiva, en el ciclo de vida del edificio.

Como resultado hoy en día se dispone de múltiples metodologías para certificar el grado de sostenibilidad de una edificación: sistemas de evaluación ambiental, etiquetas ecológicas, herramientas de evaluación de la sostenibilidad de los edificios, así como normativas sectoriales, que se aproximan al problema desde diferentes perspectivas (Vega Clemente, 2015). Estos sistemas de evaluación y calificación buscan sintetizar de forma cuantitativa y objetiva el comportamiento del edificio y sus impactos. El objetivo de este trabajo ha sido hacer una recopilación de las metodologías existentes, así como su clasificación, con la finalidad que pueda ser utilizado como una guía para los diferentes actores implicados en cuanto a la elección de la más adecuada, en función de sus necesidades.

2. Clasificación de las metodologías de evaluación

En la actualidad se dispone de diversas metodologías que permiten evaluar, clasificar y certificar el grado de sostenibilidad de una edificación. Las referencias bibliográficas consultadas muestran que existen diferentes formas de clasificarlas, atendiendo a diferentes criterios. En este trabajo se ha optado por utilizar la clasificación establecida por la Sociedad pública de Gestión Ambiental del Gobierno Vasco, que tienen en cuenta sus características comunes, objetivos y ámbito de aplicación (IHOBE Sociedad Pública de Gestión Ambiental, 2010): (i) Sistemas de Evaluación de la Sostenibilidad, (ii) Estándares de Edificación y (iii) Herramientas; finalmente, dada la importancia que va a tomar en los próximos años en Europa, se ha incluido un cuarto grupo, (iv) correspondiendo con los Level(s).

En este trabajo se han catalogado un total de 95 metodologías identificadas a nivel mundial, cuyas características generales se recogen en la Tabla 1. En el siguiente apartado se realiza una breve de cada una de las tipologías indicadas.

3. Descripción de las metodologías identificadas

3.1. Sistemas de Evaluación de la Sostenibilidad de las Edificaciones

Los primeros sistemas de evaluación surgen en el año 1989, observándose una evolución que ha conducido hasta identificar un total de 330 en la actualidad (Figura 1). En este trabajo se han identificado un total de 55 sistemas de evaluación (Tabla 1), cuyo ámbito de aplicación es Europa, Asia y Oceanía, América del Norte, etc. (Figura 2).

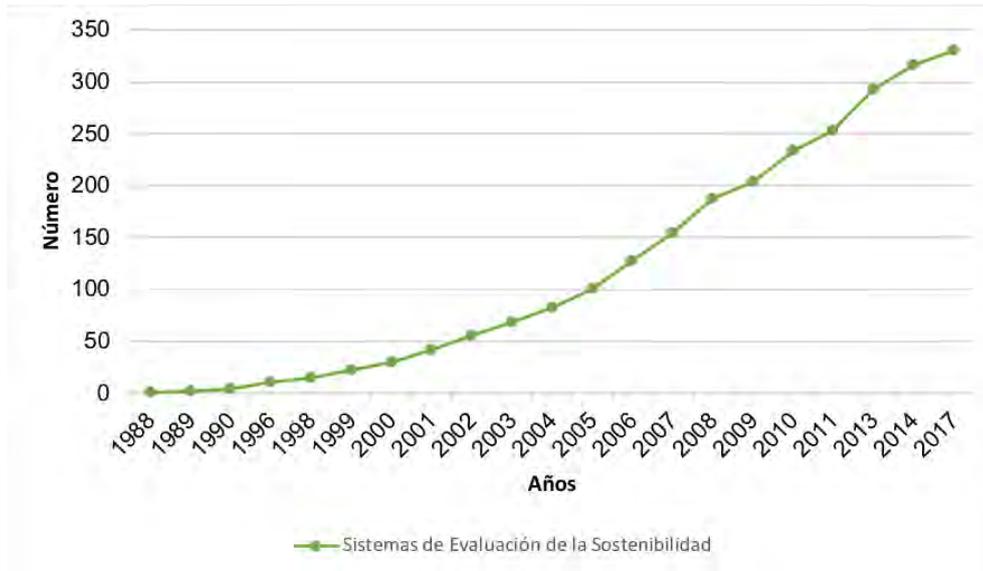


Figura 1: Evolución de los Sistemas de Evaluación

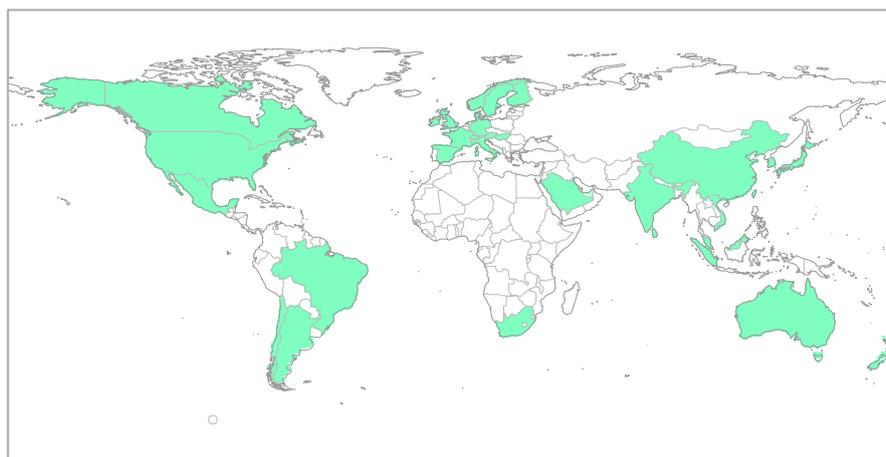


Figura 2: Localización Sistemas de Evaluación

Los sistemas de evaluación de la sostenibilidad de edificios tienen como objetivo evaluar la sostenibilidad de un edificio y/o los sistemas y subsistemas que lo conforman, permitiendo obtener una valoración global en función del cumplimiento de una serie de parámetros o criterios de sostenibilidad predefinidos (ambientales, económicos, sociales y técnicos), que se actualizan constantemente (Doan et al., 2017); que aplicados desde las primeras fases de desarrollo del proyecto arquitectónico, facilita una concepción del edificio eficiente en su funcionamiento y respetuoso con su entorno considerando valores ambientales, sociales y económicos (Evaluaci & Edificios, s. f.) (Awadh, 2017)(Ferreira, Pinheiro, & de Brito, 2014). Son capaces de evaluar, mejorar y potenciar la sostenibilidad ambiental del edificios, a lo largo de todo su ciclo de vida (Nguyen & Altan, 2011)(Ferreira et al., 2014) mediante, el análisis de sus consumos de energía, de las características del sitio, del bienestar interior y de los efectos sobre la salud humana, entre otros.

Exponen de manera sencilla y visual a los usuarios, el por qué su edificio es sostenible. Son voluntarios, de carácter educativo y cuyo fin es la concienciación de los agentes implicados. Están lo potenciados por organismos gubernamentales o los desarrollados por organizaciones

no dependientes del gobierno, que tratan un mayor número de aspectos ambientales y tipologías. La mayor parte de los sistemas de evaluación se centran en la valoración de las construcciones de nueva edificación, ya que la mayor parte de las acciones que afectan a los impactos durante la fase de uso de las edificaciones son adoptadas durante la fase de diseño (Ferreira et al., 2014). En algunos casos, estos sistemas también pueden cubrir proyectos a escala urbana, de comunidades y barrios (Bernardi, Carlucci, Cornaro, & Bohne, 2017)

Estos sistemas de evaluación se estructuran en tres grandes grupos: aquellos basados en la valoración de actuaciones, establecidas en créditos a los que se asocia un número de puntos en función de la importancia en los impactos asociados al crédito (LEED y BREEAM); los basados en el concepto de ecoeficiencia (CASBEE) y los basados en el cálculo de la reducción de impactos asociados a la incorporación de medidas de diseño y factores de rendimiento establecidas en una lista de criterios (Macías & García Navarro, 2010).

Cada uno de los sistemas emplea diferentes términos y se basa en sus propias reglas y sistemas de puntuación. Identificándose hasta siete niveles diferentes (categorías y subcategorías, estrategias, criterios, indicadores, puntuación, ponderación y valoración). El proceso de evaluación de la edificación, se divide en 3 fases, evaluación, clasificación y certificación. En general se pueden distinguir 3 tipos de Sistemas, en función de las fases que logren alcanzar:

- Sistema de evaluación: que permiten obtener una puntuación global correspondiente a una edificación en función del cumplimiento de una serie de indicadores de sostenibilidad o reducción de impactos
- Sistema de evaluación y clasificación, ofrecen un doble sistema de medición, que permite, por un lado, calcular una puntuación global para el conjunto del edificio, y por otro, una gradación de las puntuaciones globales que permite asignar un nivel específico a la edificación, es decir, clasificar las edificaciones.
- Sistema de evaluación, clasificación y certificación: cuya evaluación es llevada a cabo (o verificada) por un asesor cualificado. El hecho de certificar un edificio mediante un sistema determinado, supone un coste económico importante y que no todas las edificaciones pueden permitirse.

3.2. Estándares de Edificación Sostenible

Los primeros estándares de edificación sostenible surgen en el año 1990, observándose una evolución que ha conducido hasta identificar un total de 22 en la actualidad (Figura 3). En este trabajo se han identificado un total de 7 sistemas de evaluación (Tabla 1), cuyo ámbito de aplicación es Europa y América del Norte (Figura 4).

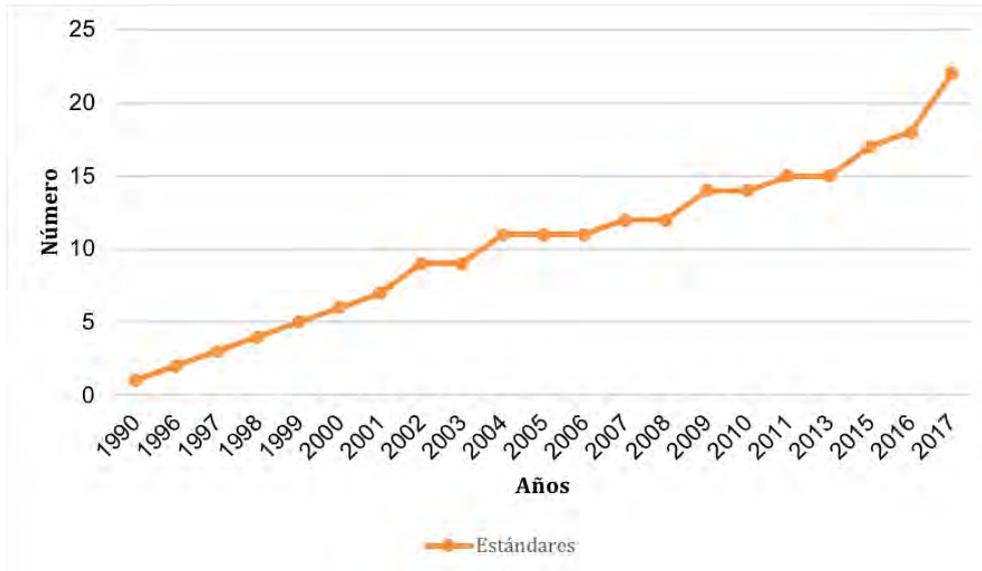


Figura 3: Evolución de los Estándares de edificación sostenible

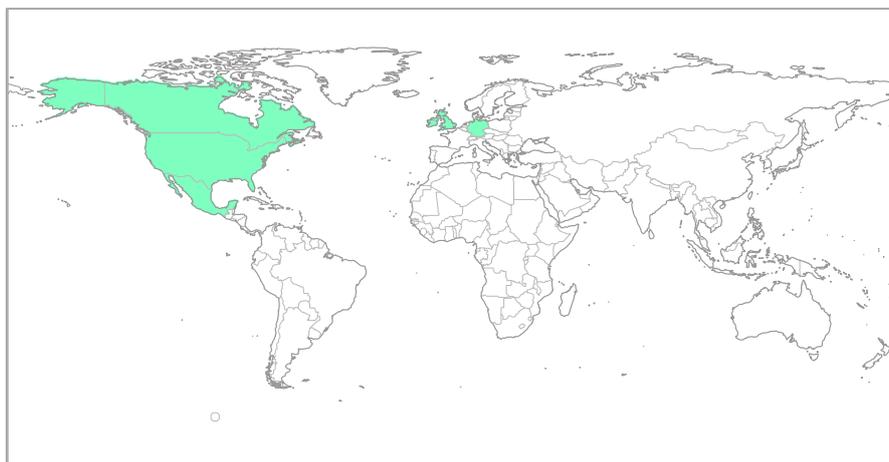


Figura 4: Localización Estándares de edificación sostenible

Se trata de metodologías cuyo objetivo es la exigencia de unos requisitos mínimos de comportamiento (IHOBE Sociedad Pública de Gestión Ambiental, 2010) que permiten determinar si ese edificio y/o los sistemas y subsistemas que lo conforman, cumplen o no cumplen los requisitos; no establecen una gradación entre edificaciones sostenibles, ni realizan una clasificación, ni evaluación entre distintos proyectos o edificaciones, suelen ser habitualmente aceptados como sinónimo de “buenas prácticas”. Los estándares no abarcan el estudio completo del Ciclo de Vida del edificio ni incluyen proyectos de desarrollo urbano, sino que se centran, por lo general, en la fase de uso del edificio, y de forma particular en su aspecto energético, buscando edificios que sean capaces de cubrir todas sus demandas energéticas, sin emitir gases de efecto invernadero. Se basan en el establecimiento de tres elementos fundamentales: limitación del consumo de energía primaria, estableciendo límites máximos, mejorando la eficiencia de las instalaciones proyectadas, y aportaciones de energía procedente de fuentes renovables; calidad y confort térmico, basándose en la reducción de puentes térmicos, la alta estanqueidad y la eficiente renovación del aire; y catálogo de sistemas constructivos, orientados a cumplir los parámetros anteriores.

Son iniciativas mucho más directas y relacionadas con los usuarios finales que lo que suponen los sistemas de evaluación. Estas iniciativas parten generalmente del propio promotor o del usuario final de la edificación. Si bien el etiquetado de eficiencia energética es generalmente obligatorio (Bernardi et al., 2017), estos estándares son por lo general son de aplicación voluntaria.

3.3. Herramientas de Evaluación

Las primeras herramientas de evaluación surgen en el año 1975, observándose una evolución que ha conducido hasta identificar un total de 96 en la actualidad (Figura 5). En este trabajo se han identificado un total de 33 herramientas de evaluación (Tabla 1), cuyo ámbito de aplicación es Europa y América del Norte (Figura 6).

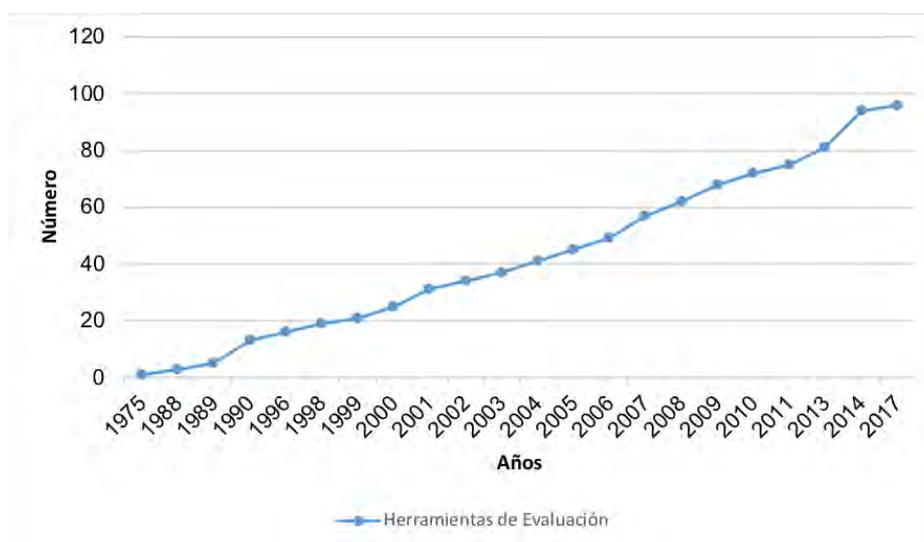


Figura 5: Evolución de las Herramientas de Evaluación



Figura 6: Localización Herramientas de Evaluación

Se trata de programas informáticos que permiten evaluar en profundidad distintas características de un edificio, genéricas o específicas, simplifican muchos cálculos y no tienen como fin propio la certificación, ni la clasificación, ni son de carácter gratuito, sino que sirven al proyectista como herramienta de apoyo para el diseño sostenible del edificio, para poder lograr una mejor evaluación realizada por alguno de los sistemas o estándares anteriores. Se

trata por tanto de programas informáticos de apoyo al resto de las metodologías, no siempre necesarios, por lo que resultan insuficientes para generar una evaluación completa.

Existe una variedad de herramientas diferentes para componentes de construcción, edificios completos y marcos de evaluación de edificios completos. Estas herramientas son globales (SimaPro), nacionales (BEES, ATHENA, BEAT, Invest 2) y, en algunos casos, locales. Algunas herramientas nacionales pueden usarse como herramientas globales al cambiar las bases de datos nacionales. Las herramientas se desarrollan para diferentes propósitos, por ejemplo, investigación, consultoría, toma de decisiones y mantenimiento; La gran mayoría, son de pago, a excepción de algunas como, BEES o eVerdEE, aunque la mayoría tiene precios reducidos para fines educativos (Haapio & Viitaniemi, 2008). Se han distinguido 2 tipos de herramientas; las basadas en el ACV y las que se basan en la evaluación del comportamiento energético de los edificios. Cada una de las herramientas de evaluación basadas en el ACV, se basan en la misma metodología y presentan rasgos comunes; realizan un inventario por partes, distinguiendo entre los tres niveles que conforman el edificio (los materiales, los componentes y el propio edificio) e incorporan bases de datos de materiales y/o soluciones constructivas, condiciones climáticas, etc..., que incluyen datos de impactos ambientales y sirven de asesoramiento en la fase inicial del proyecto, además, estos programas permiten, a partir de dichos datos, simular cuál va a ser el comportamiento ambiental del edificio a lo largo de todo su ciclo de vida, teniendo en cuenta el conjunto de impactos de una edificación.

Las herramientas basadas en el comportamiento energético, a diferencia de las anteriormente descritas, solo se centran en un aspecto ambiental concreto, el consumo energético, a través del estudio de los datos de ventilación, las pérdidas térmicas, etc...y permiten calcular de manera más exacta el comportamiento energético del edificio, con el fin de reducir los impactos ambientales asociados. Son herramientas de modelización a partir de un modelo 3D, de mayor o menor complejidad y detalle, que representa al edificio, al que se le asigna características de materiales y sistemas.

3.4 Level(s)

Level(S), el último de los grupos, es un nuevo marco de evaluación voluntario para mejorar la sostenibilidad y conducir la demanda hacia mejores edificios en Europa, que tiene como objetivo sensibilizar al público en general, a los promotores y a los servicios de contratación pública ante la necesidad de disponer de edificios mejores y aumentar la demanda de estos (Son, s. f.); incrementar los conocimientos sobre la eficiencia del uso de los recursos en el entorno construido con el fin de apoyar una mejor toma de decisiones por parte de los diseñadores, arquitectos, promotores, empresas de construcción, fabricantes de productos de construcción, inversores y propietarios inmobiliarios; así como, proporcionar un enfoque común en la Unión Europea para la evaluación de la sostenibilidad del entorno construido (Vella & Drinkwater, 2017)

Esta herramienta emplea indicadores sólidos, basados en los instrumentos y normas existentes, que abarcan la energía, los materiales, el agua, la salud y el bienestar, el cambio climático y el coste y el valor del ciclo de vida («¿ EN QUÉ CONSISTE LEVEL S ?», s. f.). Cada uno de los indicadores de Level(s) se ha diseñado con el objetivo de vincular el impacto ambiental de un edificio a las prioridades de la UE en el ámbito de la economía circular. Es de código abierto y está disponible gratuitamente.

Level(s) se centra en los principales aspectos del rendimiento de un edificio: emisiones de gases de efecto invernadero a lo largo del ciclo de vida del edificio, ciclos de vida de los materiales que sean circulares y eficientes desde el punto de vista de los recursos, uso

eficiente de los recursos hídricos, espacios sanos y confortables, adaptación y resiliencia al cambio climático; así como, coste y valor del ciclo de vida completo del edificio.

Tabla 1: Identificación de las principales metodologías

Grupo	Origen	Metodología	Año	Desarrollador
(I)	España	VERDE	2006	GBCe
		GESPV	2005	IHOBE
		DGNB	2011	DGNB
		BREEAM ES	2010	ITG
		SBTool PT	2007	iiSBE
	Alemania	DGNB	2007	DGNB
		BREEAM DE	2011	DIFNI
	Reino Unido	BREEAM	1988	BRE Trust
	Austria	DGNB	2009	ÖGNI
		BREEAM AT	2010	
	Luxemburgo	BREEAM LU	2009	DIFNI
	Suiza	BEEAM CH	2010	
		DGNB	2010	SGNI
	Hungría		2010	DIFNI
	Francia	HQE™Method	1996	HQE
		ESCALE	2000	CSTB
	Italia	ITACA	2004	ITACA
	República Checa	SBTool CZ	2010	iiSBE
	Finlandia	PromisE	2004	VTT
	Noruega	Økoprofil	2004	Byggforsk
	Países Nórdicos	Nordic Swan Ecolabel	1989	NCM
	Dinamarca	DGNB	2011	Denmark GBC
	EE. UU	LEED	1998	USGBC
		GREEN GLOBES	2004 2000	GBC
	Canadá	BOMA BEST	2005	BOMA Canadá
	México	PCES	2008	Gobierno Distrito Federal
	Chile	CES	2014	Ministerio de Chile
Argentina	LEED Argentina	2007	AGBC	
Brasil	LEED Brasil	2007	Brasil GBC	

		AQUA-HQE	2008	Fundação Vanzolini	
Sudáfrica		GREEN STAR SA	2008	GBCSA	
		SBAT	2002	CSIR	
Australia		GREEN STAR	2003	GBCA	
		NABERS	2008	NSW	
Nueva Zelanda		GREEN STAR NZ	2007	NZGBC	
		Homestar V4	2017	BRANZ	
Qatar		GSAS	2009	GORD	
India		LEED India	2011	Indian GBC	
		TERI-GRIHA	2007	TERI	
Emiratos Árabes		Pearl Rating System	2010	UPC	
Malasia		MYCREST	2013	KKR	
		GBI	2010	PAM	
Hong Kong		CEPAS	2002	HK	
		HK BEAM PLUS	1996	HKGBC	
Taiwan		EEWH	1999	ABRI	
China		GOBAS	2003	MOST	
		ESGB	2006	MOHURD	
		GBL	2008		
		GHEM	2002	CRECCHKI	
Japan		CASBEE	2001	JSBC	
Corea del Sur		G-SEED	2002	MOLIT	
Singapur		GREEN MARK	2005	BCA	
Vietnam		LOTUS	2007	VGBC	
Egipto		GPRS	2011	EGGBC	
Global		WELL	2014	IWBI	
Alemania		PASSIVHAUS	1990	Passivhaus	
(II) Reino Unido		ZCB	1994	NZB	
	EEUU		NZE	2000	ILFI
		NGBS	2008	NAHB	
Mexico		CEV	2007	CONAVI	
Canadá		BUILT GREEN	2001	GBI	
Canadá		ATHENA™	2002	ATHENA	
(III) EEUU		BEES 4.0	1998	NIST	
	Holanda		ECO-quantum	1999	IVAM
	Reino Unido		ENVEST II	2003	BRE
		CCaLC Tool	2007	Universidad de Manchester	

Francia	ELODIE	2006	CSTB's	
	TEAM™	1995	Ecobilan	
	EQUER	1995	MINES	
	PAPOOSE	1996	TRIBU	
Alemania	GABI	1999	IKP, GmbH	
	GEMIS	1990	Oeko-Institut	
	LEGEP®	2001		
	OpenLCA	2013	GmbH	
	Umberto	2001		
Italia	eVerDEE	2004	ENEA	
Países Bajos	SIMAPRO	1990	Pre Consultants	
Suiza	Eco-Bat	2008	Universidad de Suiza	
Suecia	Miljöstatus	1997	AECB	
	EcoEffect	2006	KTH	
	BeCost	2003	VTT	
Japón	NIRE-LCA	1996	NIES	
	AIJ-LCA	2003	AIJ	
	Carbon Navigator	2009	TAISE	
	GEM-21P	2008	SHIMIZU	
Korea	SUSB-LCA	2007	Hanyang University	
	K-LCA	2004	KICT	
	BEGAS	2013	SBRC	
Australia	LISA	2003	BPH	
EEUU	Energy Plus	1998	DOE	
	TRNSYS	1975	Universidad de Wisconsin	
Reino Unido	Design Builder	N/A	DesignBuilder	
Global	Ecotect	2005	Autodesk	
(iv)	Unión Europea	LEVEL(s)	2017	Comisión Europea

4. Conclusiones

A la hora de establecer la relación entre edificación y su influencia tanto en el entorno más inmediato como en el ecosistema global, resulta necesario poner de manifiesto la relación entre la edificación y las consecuencias que a nivel medioambiental, económico, social y cultural se producen, por lo que la evaluación de edificios sostenibles es una preocupación mundial tanto en los países desarrollados como en los no desarrollados. En consecuencia, la rápida aceptación, por parte de los agentes implicados, del concepto de sostenibilidad en la edificación y el entorno construido ha ido acompañada de un fuerte aumento en el número de metodologías de evaluación que han evolucionado a lo largo de los años y se han actualizado para ser más exigentes en línea con los avances en materia de desarrollo sostenible.

En la revisión realizada en este trabajo se observa como cada uno de los grupos metodológicos identificados, a pesar de tener como fin último alcanzar una construcción o edificación ciertamente sostenible, utiliza indicadores de sostenibilidad diferentes, además tener un ámbito de aplicación geográfico y climático diferente en cada caso. En consecuencia, si bien estas metodologías han sido muy útiles para mejorar la edificación, desde el punto de vista ambiental, por sí solas resultan incompletas, dando lugar a resultados difícilmente comparables entre sí.

En este sentido Level(s) podría ser la metodología más completa ya que evalúa todos los aspectos de la edificación sostenible a lo largo de todo su ciclo de vida, enmarcando los edificios dentro del marco de la economía circular, teniendo en cuenta, como valor añadido, la adaptación y la resiliencia al cambio climático; podría decirse que es la metodología que aglutina el resto de los 3 grupos. Además se trataría de la metodología con el mayor ámbito territorial de aplicación, ya que se corresponde con la Unión Europea.

Trabajo financiado por “Proyecto FONDECYT 11.160.524”. Chile

5. Referencias

¿ EN QUÉ CONSISTE LEVEL S ? (s. f.).

- Alavedra, P., Domínguez, J., Gonzalo, E., & Serra, J. (1997). La construcción sostenible. el estado de la cuestión. *Informes de la Construcción*, 49(451), 41-47. <https://doi.org/10.3989/ic.1997.v49.i451.936>
- Awadh, O. (2017). Sustainability and green building rating systems: LEED, BREEAM, GSAS and Estidama critical analysis. *Journal of Building Engineering*, 11, 25-29. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jobe.2017.03.010>
- Bernardi, E., Carlucci, S., Cornaro, C., & Bohne, R. (2017). An Analysis of the Most Adopted Rating Systems for Assessing the Environmental Impact of Buildings. *Sustainability*, 9(7), 1226. <https://doi.org/10.3390/su9071226>
- Blankendaal, T., Schuur, P., & Voordijk, H. (2014). Reducing the environmental impact of concrete and asphalt: A scenario approach. *Journal of Cleaner Production*, 66, 27-36. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.10.012>
- Carpio, M. (2015). *Tesis Doctoral. PhD Proposal* (Vol. 1). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Darko, A., Chan, A. P. C., Ameyaw, E. E., He, B. J., & Olanipekun, A. O. (2017). Examining issues influencing green building technologies adoption: The United States green building experts' perspectives. *Energy and Buildings*, 144, 320-332. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.03.060>
- de Klijn-Chevalerias, M., & Javed, S. (2017). The Dutch approach for assessing and reducing environmental impacts of building materials. *Building and Environment*, 111, 147-159. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.11.003>
- Dixit, M. K., Culp, C. H., & Fernández-Solís, J. L. (2013). System boundary for embodied energy in

- buildings: A conceptual model for definition. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 21, 153-164. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.12.037>
- Doan, D. T., Ghaffarianhoseini, A., Naismith, N., Zhang, T., Ghaffarianhoseini, A., & Tookey, J. (2017). A critical comparison of green building rating systems. *Building and Environment*, 123, 243-260. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.07.007>
- Dong, Y. H., & Ng, S. T. (2015). A life cycle assessment model for evaluating the environmental impacts of building construction in Hong Kong. *Building and Environment*, 89, 183-191. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.02.020>
- Evaluaci, T. D. E., & Edificios, A. D. E. (s. f.). Un método de evaluación ambiental de edificios.
- Ferreira, J., Pinheiro, M. D., & de Brito, J. (2014). Portuguese sustainable construction assessment tools benchmarked with BREEAM and LEED: An energy analysis. *Energy and Buildings*, 69, 451-463. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.11.039>
- Giannetti, B. F., Demétrio, J. C. C., Agostinho, F., Almeida, C. M. V. B., & Liu, G. (2018). Towards more sustainable social housing projects: Recognizing the importance of using local resources. *Building and Environment*, 127(July 2017), 187-203. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.10.033>
- Haapio, A., & Viitaniemi, P. (2008). A critical review of building environmental assessment tools. *Environmental Impact Assessment Review*, 28(7), 469-482. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.eiar.2008.01.002>
- Hamdy, M., Carlucci, S., Hoes, P. J., & Hensen, J. L. M. (2017). The impact of climate change on the overheating risk in dwellings—A Dutch case study. *Building and Environment*, 122(August 2003), 307-323. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.06.031>
- IHOBE Sociedad Pública de Gestión Ambiental. (2010). Green Building Rating Systems: ¿Cómo evaluar la sostenibilidad en la edificación? *Ihobe*, (1ª Edición), 72.
- Macías, M., & García Navarro, J. (2010). Metodología y herramienta VERDE para la evaluación de la sostenibilidad en edificios. *Informes de la Construcción*, 62(517), 87-100. <https://doi.org/10.3989/ic.08.056>
- Miller, D., Doh, J. H., Panuwatwanich, K., & Van Oers, N. (2015). The contribution of structural design to green building rating systems: An industry perspective and comparison of life cycle energy considerations. *Sustainable Cities and Society*, 16(C), 39-48. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2015.02.003>
- Nguyen, B. K., & Altan, H. (2011). Comparative Review of Five Sustainable Rating Systems. *Procedia Engineering*, 21, 376-386. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.2029>
- Sandanayake, M., Zhang, G., & Setunge, S. (2018). A comparative method of air emission impact assessment for building construction activities. *Environmental Impact Assessment Review*, 68(December 2016), 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2017.09.003>
- Son, D. P. (s. f.). Presentación De Level S. Recuperado a partir de [http://ec.europa.eu/environment/eusss/pdf/Level\(s\)_factsheet-ES-web.pdf](http://ec.europa.eu/environment/eusss/pdf/Level(s)_factsheet-ES-web.pdf)
- Vega Clemente, R. (2015). *Evaluación de la Sostenibilidad de Sistemas de Construcción Industrializados de Fachada en Edificios de Vivienda Colectiva*.
- Vella, K., & Drinkwater, J. (2017). La Comisión lanza el primer instrumento a escala de la UE para la notificación del rendimiento de los edificios en materia de sostenibilidad.
- Yılmaz, M., & Bakış, A. (2015). Sustainability in Construction Sector. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 195, 2253-2262. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.06.312>

Correspondencia (Para más información contacte con):

Nombre y Apellido: Carmen Díaz López

Teléfono: +34629890542

E-mail: carmendiaz@ugr.es

Cesión de derechos

Por la presente, y como autor del trabajo mencionado arriba, cedo al Palacio de Ferias y Congresos de Málaga una licencia no-exclusiva irrevocable para imprimir, reproducir, distribuir, transmitir o comunicar de cualquier manera dicho trabajo, incluyendo el derecho de hacer modificaciones de formato. Además, afirmo que esta cesión no lesiona los derechos de terceros.



Jamal Toutouh
Universidad de Málaga

CONDUCCIÓN SOCIAL COOPERATIVA EN CIUDADES INTELIGENTES

Resumen

Uno de los mayores retos a los que se enfrentan las sociedades modernas es la movilidad urbana. La congestión de las carreteras y los problemas de seguridad vial son considerados factores clave en la degradación de la calidad de vida de los ciudadanos. Las innovaciones tecnológicas que consigan mejorar la movilidad marcarán gran parte del futuro de las ciudades inteligentes. Una de las tecnologías más prometedoras aplicadas a este ámbito son las redes vehiculares ad hoc. Estas redes de comunicación inalámbrica permiten la comunicación directa, gratuita y dinámica entre vehículos cercanos y de estos con elementos de la infraestructura vial.

Estas redes de comunicación están marcando la industria del automóvil actual, ya que han propiciado el surgimiento del vehículo conectado y la Conducción Social Cooperativa (Cooperative Social Driving, CSD). El acceso a distintas fuentes de información permite ampliar enormemente las funcionalidades del vehículo. El CSD permite que los vehículos cercanos puedan interactuar intercambiando información relevante en tiempo real. Esta información puede haber sido recogida por los sensores del vehículo, introducida por usuarios o recibida de otro vehículo. De este modo los conductores circulan con una percepción más completa del estado real del tráfico y pueden ser advertidos sobre la existencia de obstáculos, accidentes, peatones en la vía u otro cualquier hecho importante. También se pueden desarrollar utilidades, como crear nubes para el intercambio de documentos, fotos, vídeos y juegos.

El CSD se sustenta en el intercambio de archivos, siendo capital que la transferencia de los mismos sea óptima. El que un mensaje llegue y que lo haga a tiempo representa la diferencia de evitar o no una situación peligrosa. Nuestro grupo de investigación ha desarrollado protocolos para este fin, y ha optimizado los existentes para que comiencen a ser útiles en situaciones reales de velocidades variadas y volatilidad de la conexión.

Por lo general, son expertos quienes por su experiencia o llevando a cabo experimentos de laboratorio proponen la configuración de un protocolo. En el presente artículo se presenta la aplicación de la Inteligencia Computacional para la configuración automática e inteligente de protocolos aplicados en redes vehiculares. Para ello se ha definido la configuración de protocolos como un problema de optimización y se han diseñado algoritmos inspirados en la naturaleza para resolverlo. Entre los algoritmos empleados destacan los Algoritmos Genéticos, que se basan en la Teoría de Darwin de la evolución de las especies, y los algoritmos de Optimización por Cúmulo de Partículas, inspirados en el comportamiento social de los animales como las aves en una bandada.

Estos algoritmos se han combinado con un simulador de redes vehiculares realista y de forma automática han calculado configuraciones óptimas que han mejorado

considerablemente el rendimiento de los protocolos de comunicación analizados. En las pruebas reales en ciudad (Málaga), sólo los protocolos optimizados empleando nuestra metodología han podido transmitir la información que se requería de un vehículo a otro. Las aplicaciones posibles son innumerables, y la tecnología está lista para generar productos que se acepten en el mercado actual.

Palabras clave: *movilidad inteligente; redes vehiculares ad hoc; conducción social cooperativa; inteligencia computacional*

Área temática: *Actuaciones sostenibles del espacio urbano*

Abstract

Most of the world population lives in urban areas, and it is expected that the number of inhabitants in cities will be 75% of the world's population by 2050. Thus, a wide range of challenges have to be faced by the different city stakeholders in order to mitigate the negative effects of a very fast growth of such urban areas. One of the main concerns in modern cities is mobility. The vast increment in the volume of urban road traffic experienced during the last decades causes serious issues that have to be confronted with new tools. Traffic jams bother the daily life of the population, mainly because traffic congestion causes longer trip times and a larger associated pollution, not to mention the economic losses due to delays and other transport problems. Thus, great efforts are being made to develop Smart Mobility solutions.

Vehicular ad hoc networks (VANETs) are based on the spontaneous creation of a wireless network for data exchange between vehicles, mainly. Wireless networking technologies are used in VANETs, including short range radio and cellular. These communication networks are leading the automotive industry today, as they have led to the emergence of the connected vehicle and the Social Cooperative Driving (CSD). CSD allow drivers and vehicles to access different data sources in order to increase the knowledge about the current road traffic status. Besides, other types of infotainment services and applications can be deployed using VANETs.

File transferring is always an essential service in VANETs since their ultimate purpose is the exchange of information among the nodes. Thus, it is desirable to optimize the file transferring protocol to provide the applications with the best service possible. One of the ways to get such an efficient protocols is to better fit their configuration parameters to the VANETs specifications. This study proposes the application of Computational Intelligence to obtain automatically optimal protocol configurations for vehicular environments. The main idea is to define the protocol configuration as an optimization problem and address it by using intelligent tools, such as metaheuristics, and a realistic simulation procedure to evaluate the obtained solutions.

In this work, we have carried out a real world testbed at streets of Málaga in order to study the performance of the analyzed file transfer protocol by exchanging information between cars in a real urban. These experiments have confirmed the efficiency of configuring VANET nodes with protocols improved by applying our methodology.

1. Introducción

Desde que las diferentes civilizaciones empezaron a organizarse en núcleos urbanos se pudo comprobar que la movilidad, tanto interna como inter-urbana, condicionaría el desarrollo de las ciudades. En la actualidad, con la mayoría de la población mundial viviendo en ciudades (se espera que en 2050 sobre un 70% de la población mundial se concentre en núcleos urbanos), la movilidad es uno de los grandes retos a los que nos tenemos que enfrentar. Según estimaciones de la Comisión Europea los problemas de congestión de las redes viales cuestan un punto porcentual del Producto Interior Bruto de los presupuestos de la Unión, lo que se traduce en un sobrecoste del orden de mil millones de euros al año. A su vez, se estima que el 23% de la polución que existe en las ciudades europeas lo generan los vehículos de transporte por carretera y a todo esto hay que añadirle los costes humanos y económicos de los accidentes que se producen en las redes viales. Así, desde diferentes iniciativas de Ciudades Inteligentes o Smart Cities se están invirtiendo innumerables esfuerzos en proveer de sistemas de Movilidad Inteligente o Smart Mobility para ofrecer una respuesta adecuada al reto de proporcionar un transporte urbano más eficiente, seguro y cómodo, que está siendo cada vez más exigente.

Gracias a la aplicación de los últimos avances en tecnologías de la información y la comunicación (TIC) en entornos de movilidad vial se ha desarrollado la aparición de las redes vehiculares ad hoc o VANET (*vehicular ad hoc networks*). Estas redes de comunicación inalámbrica sin infraestructura se forman de forma espontánea, principalmente entre vehículos cercanos y distintos elementos de la infraestructura vial como semáforos, señales, paneles o sensores. Estas redes de comunicación inalámbrica permiten la comunicación directa, gratuita y dinámica entre vehículos cercanos y de estos con elementos de la infraestructura vial (Campolo y col., 2015) .

Las VANET están marcando la industria del automóvil actual, ya que han propiciado el surgimiento del vehículo conectado y la Conducción Social Cooperativa (*Cooperative Social Driving*, CSD). El acceso a distintas fuentes de información permite ampliar enormemente las funcionalidades del vehículo. El CSD permite que los vehículos cercanos puedan interactuar intercambiando información relevante en tiempo real. Esta información puede haber sido recogida por los sensores del vehículo, introducida por usuarios o recibida de otro vehículo. De este modo los conductores circulan con una percepción más completa del estado real del tráfico y pueden ser advertidos sobre la existencia de obstáculos, accidentes, peatones en la vía u otro cualquier hecho importante. También se pueden desarrollar utilidades, como crear nubes para el intercambio de documentos, fotos, vídeos y juegos.

Aplicando CSD se pueden desarrollar aplicaciones revolucionarias en el ámbito de la seguridad y la eficiencia vial, siendo un eje fundamental de los futuros Sistemas Inteligentes de Transporte o *Intelligent Transportation Systems* (ITS). Dichas aplicaciones facilitarán que los vehículos puedan intercambiar información avisando sobre futuras maniobras o situaciones peligrosas, de este modo se podrá asistir al conductor para evitar situaciones de peligro e incluso accidentes, lo cual es importante porque se estima que el 90% de los accidentes tienen como causa principal el error humano. A su vez, se desarrollarán aplicaciones que mejorarán la eficiencia de los transportes por carretera proponiendo rutas e itinerarios acordes con el estado del tráfico en tiempo real y los perfiles de cada conductor.

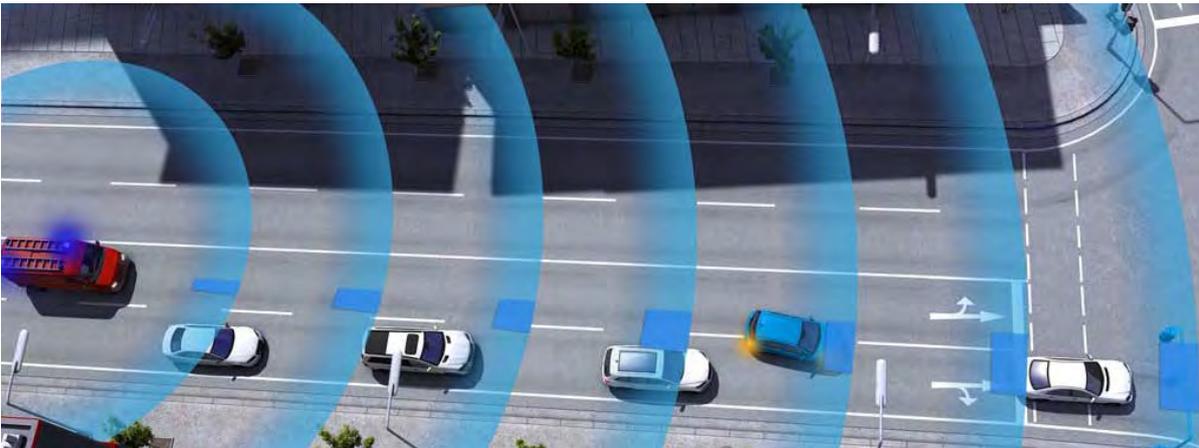
La Figura 1 muestra dos casos de aplicación de CSD para proporcionar movilidad inteligente en nuestras ciudades: a) aviso de accidente de tráfico en la vía pública, reduzca la velocidad y/o cambie de ruta; y b) precaución porque hay un vehículo de emergencias acercándose a su posición.

Figura 1. Casos de uso de la CSD (C2C-CC, 2015)

a) Aviso de accidente de tráfico en la vía pública.



b) Vehículo de emergencias acercándose a su posición.



El CSD se sustenta en el intercambio de archivos, siendo capital que la transferencia de los mismos sea óptima. El que un mensaje llegue y que lo haga a tiempo representa la diferencia de evitar o no una situación peligrosa. Nuestro grupo de investigación ha desarrollado protocolos para este fin, y ha optimizado los existentes para que comiencen a ser útiles en situaciones reales de velocidades variadas y volatilidad de la conexión (CARLINK, 2006).

Por lo general, son expertos quienes por su experiencia o llevando a cabo experimentos de laboratorio proponen la configuración de un protocolo. En el presente artículo se presenta la aplicación de la Inteligencia Computacional para la configuración automática e inteligente de protocolos aplicados en redes vehiculares. Para ello se ha definido la configuración de protocolos como un problema de optimización y se han diseñado algoritmos inspirados en la naturaleza (metaheurísticas) para resolverlo. Entre los algoritmos empleados destacan los Algoritmos Genéticos (*Genetic Algorithms*, GA), que se basan en la Teoría de Darwin de la evolución de las especies, y los algoritmos de Optimización por Cúmulo de Partículas (*Particle Swarm Optimization*, PSO), inspirados en el comportamiento social de los animales como las aves en una bandada (Blum y Roli, 2003).

Estos algoritmos inteligentes, combinados con un simulador de redes vehiculares realista, han calculado de forma automática configuraciones óptimas que han mejorado considerablemente el rendimiento de los protocolos de comunicación analizados.

Asimismo, hemos decidido sacar la experimentación del laboratorio y llevarla a la calle. Por lo que una vez mejorado los protocolos de comunicación, se han realizado pruebas de campo con vehículos equipados con dispositivos que faciliten la comunicación empleando una VANET circulando por las calles de Málaga. En estas pruebas sólo los protocolos

optimizados con nuestra metodología han podido transmitir la información que se requería de un vehículo a otro con los requisitos establecidos.

Si revisamos la literatura, podemos encontrar trabajos que han aplicado diferentes metaheurísticas para la optimización de protocolos, ya sea para mejorar la calidad de servicio que ofrecen como para reducir los requisitos de recursos que necesitan (Bitam S. y Mellouk, 2014; Toutouh, 2016). La optimización de protocolos de difusión (*broadcasting*) para redes vehiculares fue analizada por Abdou y col. (2011) y Galaviz-Mosqueda y col. (2016). Estos autores aplicaron algoritmos metaheurísticos basados en GA para mejorar el rendimiento de estos protocolos y reducir los problemas de congestión de la red. A su vez, se han aplicado este tipo de soluciones para optimizar protocolos de encaminamiento (*routing*). Lobiyal y col. (2015) aplicó un algoritmo inspirado en PSO para mejorar la entrega de paquetes de datos aplicando el protocolo de encaminamiento AODV. En Toutouh y Alba (2015), analizamos la optimización del mismo protocolo de enrutamiento aplicando dos algoritmos de optimización multi-objetivo, uno basado en GA y otro en PSO. Otro protocolo de encaminamiento que también se ha estudiado es el OLSR. Un conjunto de cinco metaheurísticas fueron aplicadas para optimizar dicho protocolo (Toutouh y col, 2012). En todos estos trabajos previos validan sus resultados empleando simuladores de VANET, lo que limita el realismo de los resultados que ofrecen. Nosotros por el contrario, en el presente trabajo lo hacemos empleando experimentos de campo.

Así, los objetivos principales de este trabajo de investigación son los siguientes: a) introducir al lector a la revolucionaria tecnología de las redes vehiculares y la CSD; b) enumerar los principales retos que presenta su desarrollo, centrándose en la optimización de los protocolos; c) aplicar metaheurísticas para resolver dicho problema; y d) validar mediante pruebas reales de campo los resultados obtenidos.

Este documento se organiza como sigue. En la siguiente sección introducimos el concepto de VANET y discutimos sus principales problemas. La Sección 3 presenta el problema de optimización definido para mejorar el protocolo de transferencia de archivos. La Sección 4 describe la metodología empleada para resolver el problema. Las secciones 5 y 6 presentan los resultados experimentales de la optimización del protocolo y las pruebas de campo, respectivamente. Finalmente, en la Sección 7, se presentan las conclusiones de este trabajo y las principales líneas de trabajo futuro.

2. Comunicación Eficiente en Redes Vehiculares

Uno de los pilares del CSD son las redes vehiculares ad hoc o VANET (*vehicular ad hoc networks*). Las VANET son redes descentralizadas que proveen de una plataforma para el diálogo continuo de vehículos entre sí (*vehicle-to-vehicle* o V2V) y con los elementos de la infraestructura vial (*vehicle-to-infrastructure* o V2I) como semáforos, señales de tráfico, etc. Asimismo, aprovechando que los vehículos pueden contar con dispositivos de conexión a redes celulares (como teléfonos móviles) también se definen las comunicaciones de banda ancha (*vehicle-to-broadband* o V2B), aunque solo para cierto tipo de servicios (Hartenstein y Laberteaux, 2009; Campolo y col., 2015).

Figura 2. Escenario VANET típico.



Debido a que las VANET comunican de forma directa y a que los vehículos están en continuo movimiento, cuentan con una serie de características que las hace únicas dentro del dominio de las redes móviles. Estas son las siguientes:

- Nodos con alta capacidad de cómputo y energía: Los vehículos que pertenecen a las VANET cuentan con ordenadores de a bordo que tienen una capacidad de cómputo muy competitiva. A su vez, estos dispositivos se encuentran conectados a la fuente de energía del vehículo (batería y alternador) por lo que no tienen restricciones de energía elevada.
- Control totalmente descentralizado: No existe ninguna entidad central o servidor que se encargue de la gestión de la red, por lo que se hace de forma totalmente distribuida entre los nodos de la red.
- Alta movilidad, pero predecible de los nodos: La mayoría de los nodos de las VANET son vehículos que se mueven a altas velocidades. Asimismo, los vehículos se mueven siguiendo los patrones que les indican las carreteras y las normas de circulación, por lo que se puede predecir cuál va a ser el movimiento que lleve un nodo.
- Topología de la red altamente variable: La topología formada por los nodos de la red tiende a cambiar de forma rápida y continua. Esto se debe a principalmente dos factores que dificultan el mantenimiento de la conectividad entre nodos. Estos son: a) los nodos de las VANET emplean tecnologías de comunicación inalámbrica basadas en los protocolos de IEEE 802.11 (corto alcance) y b) la movilidad de los nodos es muy alta.
- Variabilidad en las condiciones en las que se da la comunicación: Las VANET se pueden desplegar en diferentes entornos, tanto en áreas urbanas como interurbanas. En las primeras la existencia de edificios, árboles y todo tipo de obstáculos limitan la propagación de la señal inalámbrica, y con ello, la calidad de servicio de la red. Fuera de las ciudades, las condiciones de propagación de la señal son más favorables, pero los nodos se mueven a mayor velocidad.

Estas características hacen del despliegue de este tipo especial de redes un desafío formidable, puesto que la mayoría de sus servicios requieren comunicaciones con unos umbrales de una calidad de servicio altos y estrictos en términos de tiempos y ratios de entrega. Por lo tanto, es necesario que los protocolos de comunicación que se empleen en VANET tengan un funcionamiento óptimo. Para así, el intercambio de información/archivos entre vehículos se haga de forma correcta y dentro de los tiempos requeridos. Esto es importante puesto que un paquete de datos o un archivo llegue en tiempo y forma puede ser la diferencia de evitar un accidente de tráfico o no.

Diferentes autores han trabajado principalmente en dos líneas de investigación para la obtención de protocolos útiles para comunicaciones vehiculares:

- Se han desarrollado un protocolo específico para el intercambio de archivos entre vehículos empleando comunicaciones VANET, el VDTP (*Vehicular Data Transfer Protocol*) (Luna S., 2008). Este protocolo permite a dos vehículos intercambiar archivos que contengan datos, imágenes, audio y vídeo.
- Se ha definido una metodología para optimizar protocolos de comunicación para redes móviles ya existentes. Para que así, estos cumplan con las restricciones de calidad de servicio cuando se usan en entornos de alta volatilidad como las redes vehiculares.

Aquí nos centramos en la segunda línea de trabajo, la optimización de protocolos. La idea fundamental es la de encontrar una configuración de los parámetros que gobiernan el funcionamiento del protocolo (contadores, temporizadores, variables de decisión, etc.) que mejor se adapten a las características de las VANET, y así ofrezcan la mejor calidad de servicio posible. Se define un proceso de optimización que se encarga de buscar de forma automática e inteligente una configuración de parámetros que mejoren de forma significativa diferentes aspectos de la comunicación, como por ejemplo, tiempos de transmisión, tasas de transferencia, etc.

Los parámetros de configuración de un protocolo tienen una fuerte relación no-lineal entre ellos y tienen una influencia difícil de evaluar de forma directa en la calidad de servicio que ofrecen. Así, una configuración simboliza un conjunto de valores continuos y discretos que dificultan la búsqueda de una configuración óptima en entornos de comunicación reales empleando técnicas de optimización clásicas (Toutouh, 2016). Por lo tanto, es necesario aplicar métodos inteligentes en los que destacan las metaheurísticas, como los Algoritmos Genéticos y los algoritmos de Optimización por Cúmulo de Partículas, capaces de obtener soluciones (configuraciones de protocolos) eficientes empleando recursos de cómputo razonables. A esto lo llamamos optimización de protocolos off-line.

3. Problema de la Optimización de la Transferencia de Archivos en VANET

El protocolo de transferencia de archivos VDTP fue desarrollado por miembros de nuestro grupo de investigación en el contexto del proyecto europeo EUREKA-CELTIC CARLINK (CARLINK, 2006). El protocolo opera en la capa de aplicación y se encarga de ofrecer un servicio transversal a todas las aplicaciones de CSD que se pueden desarrollar sobre una VANET, la transferencia de información entre dos vehículos encapsulada en archivos. Así, VDTP se emplea para transferir tanto los datos de sobre la cinemática del vehículo (velocidad, dirección, aceleración, etc.) empleados por aplicaciones de seguridad vial (archivos del orden de decenas de kilobytes), como archivos multimedia (audio o vídeo) que tienen tamaños del orden de decenas de megabytes.

VDTP es un protocolo basado en el método de parada y espera (*stop-and-wait*) específicamente diseñado para comunicaciones vehiculares (Luna S., 2008). El protocolo divide los archivos en segmentos, paquetes o tramas de un tamaño determinado y los envía de forma consecutiva, de modo que no se envía la trama siguiente hasta que no se recibe un paquete de confirmación de recepción (ACK) por parte del receptor del archivo. Así, el emisor espera un tiempo de espera determinado, si en ese tiempo no ha recibido el ACK reenvía la trama actual. Este proceso de espera y reenvío se realiza un número determinado de veces por trama, una vez llegado a ese número de veces se entiende que la comunicación entre emisor y receptor se ha perdido y se detiene la transferencia.

Como se puede comprobar por el funcionamiento de VDTP, éste depende esencialmente de tres parámetros fundamentales que condicionan su funcionamiento y su rendimiento (Luna S., 2008). Estos son los siguientes:

- El **tamaño de segmento** que es un valor entero que representa el número de bytes de datos máximos que puede encapsular una trama. Según la definición del protocolo está en el rango de que va de 128 a 524.288 (512 kilobytes).
- El **tiempo de espera** para la retransmisión de una trama en segundos que es un valor real que va de 1 a 10.

- El **máximo número de reenvíos** por segmento que es un valor entero que va del 1 al 250.

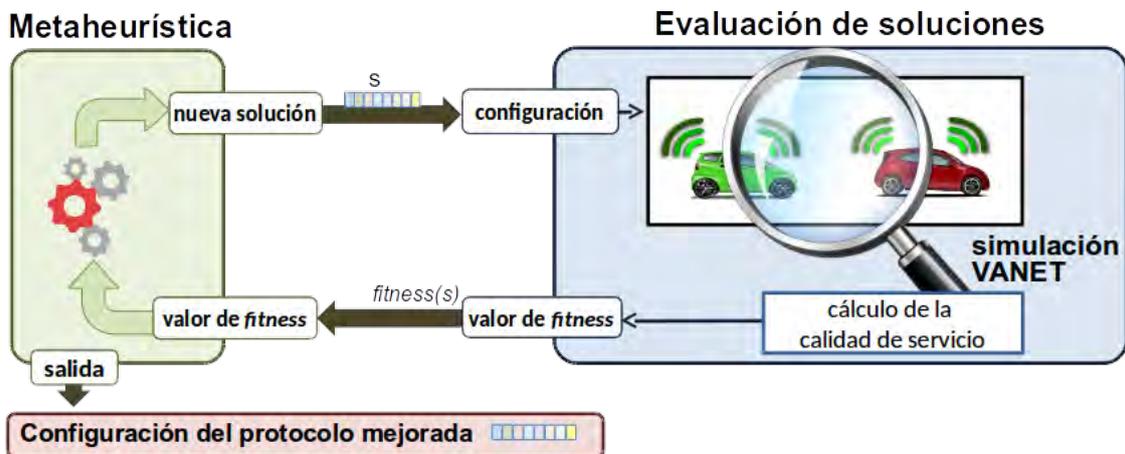
El problema de Optimización de la Transferencia de Archivos (OTA) en VANET que se trata en este estudio consiste en buscar una configuración para los tres parámetros de VDTP para mejorar la calidad del servicio del protocolo y asegurar el correcto funcionamiento de la CSD. Esto significa que se quiere minimizar los tiempos de transferencia de los archivos y el número de tramas perdidas y maximizar la cantidad de datos transferidos correctamente. Para ello se empleará una estrategia de optimización de protocolos off-line.

4. Metodología

La optimización de protocolos off-line consiste en la búsqueda automática de configuraciones factibles de los parámetros que gobiernan los protocolos, para optimizar su rendimiento. El número y el rango de valores de los parámetros que gobiernan el protocolo definen un espacio de búsqueda lo suficientemente grande y desconocido para hacer inútil el uso de métodos exactos y enumerativos para resolverlo.

La metodología de optimización seguida en este trabajo consiste en aplicar de forma conjunta una metaheurística y un proceso de simulación de una VANET que calcule la calidad de las soluciones tentativas (configuraciones del protocolo que se optimiza) que se van creando. Así, las diferentes soluciones que calculan los algoritmos de optimización son evaluadas por un simulador que configura los nodos con la solución a evaluar. Tras la simulación, se analizan distintas métricas sobre las comunicaciones, y con ellas se evalúa la calidad o *fitness* de la solución (ver Figura 2).

Figura 2. Estrategia de optimización off-line de protocolos VANET.



En este trabajo de investigación se presenta la optimización del protocolo de transferencia de archivos VDTP. La idea principal es la de maximizar la cantidad de datos que se envían dos vehículos. Para ello se ha evaluado la calidad del servicio que ofrece el protocolo en términos de cantidad de datos transmitidos en kilobytes (*datos_transmitidos*), número de segmentos de datos perdidos (*segmentos_perdidos*) y tiempo de transmisión de los archivos en segundos (*tiempo_transmision*), en un escenario en el que diferentes vehículos intercambian un número N de archivos.

Para que las metaheurísticas empleadas en este trabajo puedan realizar la búsqueda de una configuración óptima se ha de definir una función de calidad o *fitness*, que tenga en cuenta los tres parámetros de calidad de servicio empleados en este estudio. La siguiente ecuación se ha definido de forma que el problema OTA se resuelva mediante la minimización de la función f de *fitness*, y con ello, se maximice la cantidad de datos transmitidos y se minimice tanto el tiempo de transmisión como el número de segmentos perdidos.

$$f = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\text{tiempo_transmision}_i - \text{segmentos_perdidos}_i}{\log(\text{datos_transmitidos}_i + C)} \quad (1)$$

Para que el proceso de optimización obtenga una configuración óptima y aplicable al mundo real, la simulación debe obtener resultados fidedignos y realistas. Así, se han definido escenarios realistas empleando información real de la ciudad de Málaga para la evaluación de los protocolos en la simulación. Para ello se ha empleado un simulador utilizado por numerosos autores, el *Network Simulator 2* o ns-2 (Issariyakul, T. y E. Hossain, 2008). Cabe destacar que el uso de este tipo de simulaciones requieren de unos tiempos de cómputo que están en el orden de minutos.

Con afán de asegurar que los resultados obtenidos son útiles para la sociedad, hemos decidido sacar la investigación del laboratorio a las calles. Así, hemos realizado pruebas reales transferencia de archivos entre vehículos empleando el protocolo VDTP, configurando el mismo con las parametrizaciones obtenidas de forma automática por nuestra metodología y la estándar propuesta por los diseñadores.

Cinco optimizadores basados en metaheurísticas se han analizado en este trabajo para resolver OTA (Blum y Roli, 2003): cuatro basadas en población o conjunto de soluciones (PSO, GA, Evolución Diferencial o *Differential Evolution* -DE- y Estrategias Evolutivas o *Evolutionary Strategies* -ES-) y una basada en trayectoria (Enfriamiento Simulado o *Simulated Annealing* -SA-).

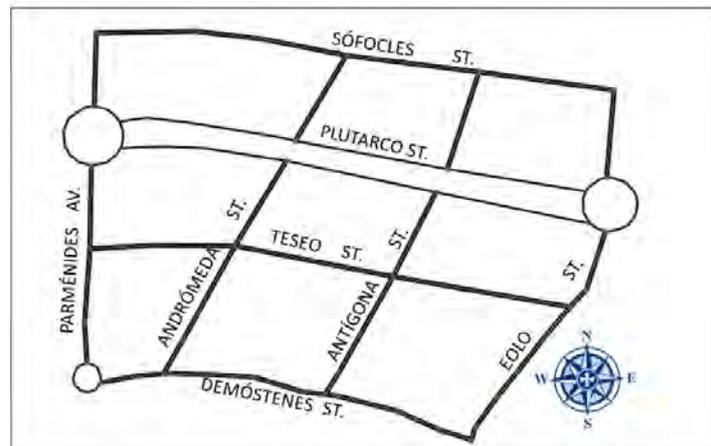
5. Evaluación Experimental

Esta sección describe los experimentos llevados a cabo para resolver el problema de optimización OTA empleando metaheurísticas. Los algoritmos utilizados para resolver dicho problema de optimización han sido implementados en C++ empleando la biblioteca de funciones MALLBA desarrollada por nuestro grupo de investigación (Alba y col., 2006). Para la evaluación de las soluciones se ha empleado ns-2 en su versión 2.31. Como las metaheurísticas son algoritmos no deterministas, se realizan 30 ejecuciones independientes de cada una de las metaheurísticas.

5.1 Instancia VANET para la Simulación de las Soluciones

Para la evaluación (simulación) de las soluciones generadas por las metaheurísticas se ha definido un escenario a partir de los datos reales de una zona cercana al Campus de Teatinos de la Universidad de Málaga en Málaga. Se simula un tiempo de 180 segundos en los que hay 30 vehículos recorriendo las carreteras que se muestran en la Figura 3 siguiendo las normas reales de tráfico y tratando de intercambiando archivos de 1024 kilobytes entre ellos usando VDTP. Para que los resultados de la simulación reflejen las interacciones reales de las comunicaciones se han seguido las recomendaciones propuestas por Alba y col. (2008).

Figura 3. Carreteras pertenecientes al escenario simulado para la evaluación de soluciones.



5.2 Configuración de los Algoritmos

Para que la comparativa entre algoritmos sea justa estos se han configurado teniendo en cuenta que todos realicen el mismo número de máximo soluciones tentativas, es decir, que el criterio de parada de los cinco algoritmos será que lleven a cabo 1000 evaluaciones de la función de *fitness*. Cada evaluación de una solución invoca al simulador ns-2 que tras simular la misma devuelve los valores de las tres métricas que tiene en cuenta la función del *fitness*. Es importante que cada simulación requiere del orden de minutos para ejecutarse.

Para que todos los algoritmos ejecuten 1000 evaluaciones del *fitness* se han configurado los algoritmos basados en población (PSO, DE, GA y ES) con una población de 20 individuos y 50 generaciones. El SA se ha configurado para que lleve 1000 iteraciones, puesto que trabaja con una única solución. Los demás parámetros de cada algoritmo se han configurado como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Configuración de las metaheurísticas para resolver OTA.

Algoritmo	Parámetro	Valor
PSO	Coefficiente local	2.0
	Coefficiente social	2.0
	Peso de inercia	0.5
DE	Probabilidad de cruce	0.9
	Probabilidad de mutación	0.1
GA	Probabilidad de cruce	0.8
	Probabilidad de mutación	0.2
ES	Probabilidad de cruce	0.9
	Probabilidad de mutación	0.1
SA	Bajada de temperatura	0.8

5.3 Resultados numéricos

La Tabla 2 resume los resultados obtenidos al aplicar las cinco metaheurísticas para resolver el problema de OTA sobre el escenario que se muestra en la Sección 5.1. Los resultados se muestran en términos de media y desviación estándar normalizada, mínimo (mejor *fitness*), mediana y máximo valores de *fitness* calculados en las 30 ejecuciones independientes.

Tabla 2. Resultados numéricos en términos de valores final de *fitness*.

Algoritmo	Media ± Desv.	Mínimo	Mediana	Máximo
PSO	1.6346 ± 17.74%	0.9077	1.7809	1.8918
DE	1.7423 ± 21.33%	0.7389	1.8658	2.0228
GA	1.9086 ± 11.84%	0.8799	1.9731	2.1614
ES	2.1517 ± 5.88%	1.8862	2.1222	2.4246
SA	2.7850 ± 31.30%	0.8730	2.1663	3.8025

PSO es la metaheurística que obtiene los mejores resultados en términos de media, mediana y máximo valores de *fitness*. Estos resultados nos llevan a asumir que las configuraciones de VDTP obtenidas empleando PSO ofrecen una transferencia de archivos rápida y robusta. Sin embargo, cabe destacar que la mejor de las configuraciones (mínimo *fitness*) ha sido calculada por DE.

Para proveer de una comparativa con significancia estadística, se ha aplicado el Test de Friedman con una significancia del 99% (Sheskin, 2007) a la distribución de los resultados para obtener un ranking. Así, el test ha devuelto que existe una diferencia significativa entre los resultados y que PSO es el algoritmo más competitivo de los cinco analizados. El ranking se completa con DE, GA, ES y SA, como segundo, tercero, cuarto y quinto respectivamente. Con estos resultados se puede concluir que PSO es la metaheurística que ha obtenido mejores resultados resolviendo OTA.

5.4 Análisis de la Calidad de Servicio de las Soluciones

Para analizar las soluciones (configuraciones de VDTP) obtenidas empleando la metodología que se ha utilizado en este trabajo, hemos realizado una comparativa de las mejores configuraciones de cada una de las metaheurísticas con las que propusieron los expertos del proyecto CARLINK. Las configuraciones analizadas y los resultados se muestran en la Tabla 3. Para ello hemos vuelto a simular dichas configuraciones sobre el escenario presentado en la Sección 5.1. La Tabla 3 también presenta los resultados.

Tabla 3. Resultados numéricos en términos de valores final de *fitness*.

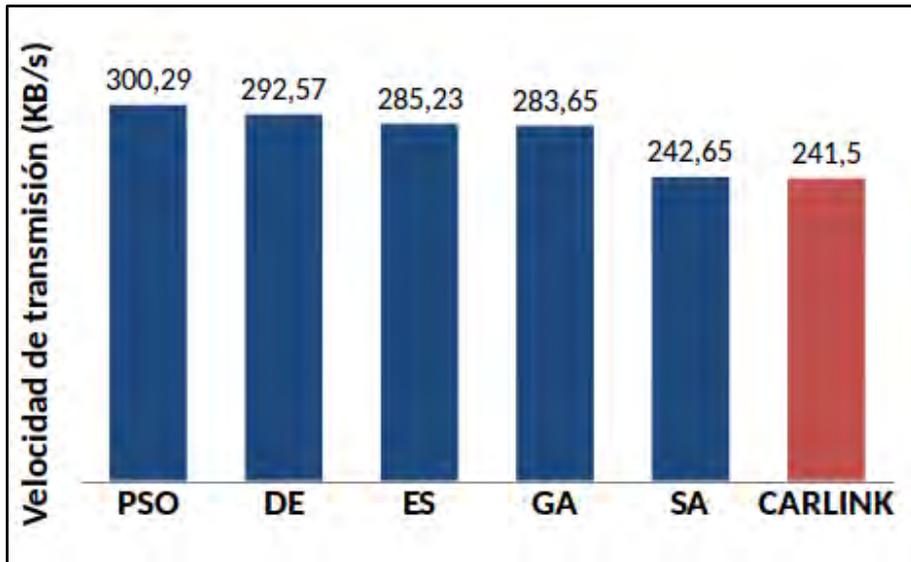
Algoritmo	Configuración VDTP			Resultado de la simulación		
	Tamaño de segmento	Tiempo de espera	Max. num. repeticiones	Tiempo de transmisión	Paquetes perdidos	Datos transmitidos
PSO	41358	10,00	3	3.41	0,27	1024
DE	28278	6,00	9	3.59	0,63	1024
GA	31196	3,83	9	3,61	0,27	1024
ES	23433	10,00	8	3,50	0,27	1024
SA	19756	6,43	3	4,22	0,36	1024
CARLINK	25600	8,00	8	4,24	1,60	1024

Los resultados que muestran la Tabla 3 muestran que todas las configuraciones simuladas han sido capaces de transferir de forma completa los archivos de 1024 kilobytes. Además, todas las configuraciones obtenidas de forma automática empleando metaheurísticas, mejoran la calidad del servicio que la configuración propuesta por los expertos de CARLINK.

Se confirma que PSO es la metaheurística que mejores configuraciones para VDTP ha obtenido. Concretamente, la configuración de VDTP de PSO simulada ha transferido los datos en el menor tiempo posible (3,41 segundos), lo que representa una reducción de un 19,5% del tiempo que requiere la configuración de los expertos. Asimismo, esta configuración es la que ha perdido el menor número de paquetes (0,27).

Estos resultados se pueden traducir en términos de velocidad de transmisión de datos efectiva de la red (kilobytes por segundo). La Figura 4 muestra dichos resultados y se puede comprobar que para casi todos los casos, las configuraciones obtenidas de forma automática consiguen velocidades significativamente superiores.

Figura 4. Resultados en términos de velocidad de transmisión efectiva.



6. Validación de los Resultados en Pruebas de Campo

Para poder evaluar la validez de los resultados obtenidos mediante simulación sobre la optimización de protocolos, se ha llevado a cabo un estudio experimental empleando vehículos y dispositivos reales en las carreteras abiertas al tráfico de Málaga.

La eficiencia de las configuraciones optimizadas frente a la propuesta por los expertos de CARLINK se ha analizado realizando transferencias de archivos entre dos vehículos equipados tal y como se muestra en la Figura 5. Para cubrir una mayor variedad de servicios para CSD. Se han realizado la transferencia de archivos de distintos tamaños (100 KBytes, 500 KBytes, 1 MByte, 5 MBytes y 10 MBytes). A su vez se han evaluado las transferencias de archivos a distintas velocidades: primero, velocidades comprendidas entre 20 y 30 km/h (velocidad reducida), y segundo, de entre 40 y 50 km/h (velocidad moderada).

Figura 5. Equipamiento para realizar las pruebas de campo de CSD.



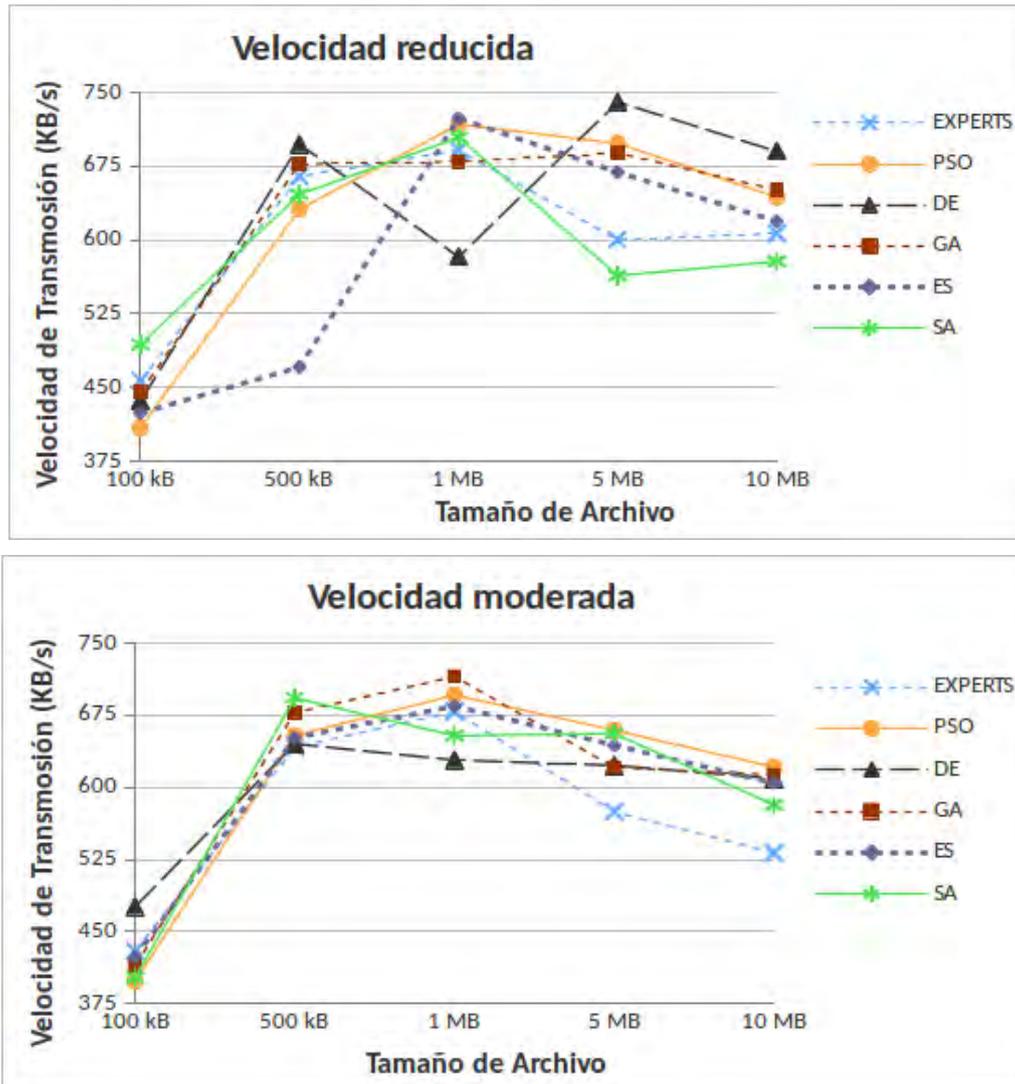
Como se puede observar en la Figura 6, durante las pruebas de campo los vehículos han estado a diferentes distancias y han tenido obstáculos entre sí. Esto mejora el realismo de los resultados que se obtienen, puesto que refleja una situación real donde se va a dar el CSD.

Figura 6. Vehículos circulando durante las pruebas de campo.



Los resultados se han analizado en términos de velocidad o tasa efectiva de transferencia (en kilobytes por segundo). De acuerdo con los resultados que se muestran en la Figura 7 se pueden sacar las siguientes conclusiones: a) los protocolos optimizados ofrecen una mayor velocidad de transferencia de datos que el estándar, b) a mayor tamaño del archivo que se transfiere, mayor es la tasa de transferencia de datos, y c) la velocidad afecta negativamente a la calidad de las comunicaciones.

Figura 7. Resultados de las pruebas de campo.



7. Conclusiones y Trabajo Futuro

En este trabajo se ha introducido la importancia de las redes vehiculares y la CSD en el diseño de soluciones innovadoras de movilidad inteligente. Así mismo, se han descrito los principales retos que presenta el despliegue de este tipo de tecnologías. Finalmente, nos hemos centrado en la optimización de protocolos, puesto que es fundamental para que las comunicaciones aseguren el buen funcionamiento de las aplicaciones basadas en CSD.

Se ha propuesto una metodología que optimiza protocolos obteniendo de forma inteligente y automática configuraciones de sus parámetros que se adaptan mejor a los requisitos de las VANET. Específicamente, se ha tratado la optimización del protocolo VDTP de transferencia de archivos mediante la definición del problema de optimización OTA. Este problema se ha tratado aplicando cinco metaheurísticas (PSO, DE, GA, ES y SA). PSO ha obtenido los resultados más competitivos en la resolución de OTA.

Asimismo, se han realizado pruebas reales de campo para comprobar el buen funcionamiento y la mejora de las configuraciones obtenidas de forma automática frente a la configuración propuesta por los expertos. Confirmándose que las configuraciones óptimas se comportan mejor que la que se propuso por los expertos de CARLINK.

Como trabajo futuro se barajan varias líneas: a) desarrollar aplicaciones reales de CSD a partir de VDTP, b) ampliar el conjunto de pruebas reales incluyendo un mayor número de vehículos y c) estudiar la aplicación de otras metaheurísticas para resolver otros problemas

de optimización en movilidad inteligente (como por ejemplo, la selección de rutas en función de la información del tráfico, el diseño inteligente de la infraestructura vial, la configuración eficiente de los planes de los semáforos, etc.).

8. Referencias

Abdou, W., A. Henriët, C. Bloch, D. Dhoutaut, D. Charlet, and F. Spies (2011). "Using an evolutionary algorithm to optimize the broadcasting methods in mobile ad hoc networks". In: *Journal of Network and Computer Applications* 34.6. Control and Optimization over Wireless Networks, pp. 1794–1804.

Alba, E., F. Almeida, M. Blesa, C. Cotta, M. Diaz, I. Dorta, J. Gabarró, J. González, C. León, L. Moreno, J. Petit, J. Roda, A. Rojas, y F. Xhafa (2006). "MALLBA: A library of skeletons for combinatorial optimisation". In: *Parallel Computing* 32.5-6, pp. 415–440.

Alba, E., S. Luna, and J. Toutouh (2008). "Accuracy and Efficiency in Simulating VANETs". In: *Modelling, Computation and Optimization in Information Systems and Management Sciences, Second International Conference (MCO)*. Vol. 14. Communications in Computer and Information Science. Metz, France - Luxembourg: Springer, pp. 568–578.

Bitam S. y Mellouk A (2014). *Bio-Inspired Routing Protocols for Vehicular Ad Hoc Networks*. Wiley, Hoboken, NJ, USA, 2014.

Blum, C. y A. Roli (2003). "Metaheuristics in combinatorial optimization: Overview and conceptual comparison". In: *ACM Computing Surveys (CSUR)* 35.3, pp. 268–308.

C2C-CC (2015). CAR 2 CAR Communication Consortium (C2C-CC). [online] Disponible en: <https://www.car-2-car.org>. Consultado en 2017.

Campolo, C., A. Molinaro, y R. Scopigno, eds. (2015). *Vehicular ad hoc Networks - Standards, Solutions, and Research*. Springer.

CARLINK (2006). CARLINK Label CP3-005. [online] Available in <http://carlink.lcc.uma.es/>. Consultado en 2018.

Galaviz-Mosqueda, A., Villarreal-Reyes, S., Galeana-Zapien, H., Rubio-Loyola, J., y R. Rivera-Rodríguez (2016). "Genetic tuning of fuzzy rule-based systems for multi-hop broadcast protocols for VANETs". *Telecommunication Systems*, 63(3), 399-420.

Hartenstein, H. y K. Laberteaux (2009). *VANET Vehicular Applications and Inter-Networking Technologies. Intelligent Transport Systems*. Upper Saddle River, NJ, USA: John Wiley & Sons.

Issariyakul, T. y E. Hossain (2008). *Introduction to Network Simulator NS2*. 1st ed. Springer Publishing Company, Incorporated.

Lobiyal, D. K., Katti, C. P. y A. K. Giri (2015). "Parameter value optimization of ad-hoc on demand multipath distance vector routing using particle swarm optimization". *Procedia Computer Science*, 46, 151-158.

Luna S. (2008). "VDTP: A File Transfer Protocol for Vehicular Ad hoc Networks". Tech. rep. [Online]. Disponible en: <http://neo.lcc.uma.es/staff/jamal/downloads/VDTP.pdf>. CARINK.

Sheskin, D. J. (2007). *Handbook of Parametric and Nonparametric Statistical Procedures*. Chapman & Hall/CRC.

Toutouh J (2016). *Natural Computing for Vehicular Networks*. PhD thesis, ETSI Informática, University of Malaga.

Toutouh, J., J. García-Nieto, and E. Alba (2012). "Intelligent OLSR Routing Protocol Optimization for VANETs". In: *Vehicular Technology, IEEE Transactions on* 61.4, pp. 1884–1894.

Toutouh J. y E. Alba (2015). "Parallel multi-objective metaheuristics for smart communications in vehicular networks". In: *Soft Computing*. In Press., pp. 1–13.

Correspondencia (Para más información contacte con):

Nombre y Apellido: Jamal Toutouh
Teléfono: +34 952 13 3303
Fax: +34 952 13 1397
E-mail: jamal@lcc.uma.es

Cesión de derechos

Por la presente, y como autor del trabajo mencionado arriba, cedo al Palacio de Ferias y Congresos de Málaga una licencia no-exclusiva irrevocable para imprimir, reproducir, distribuir, transmitir o comunicar de cualquier manera dicho trabajo, incluyendo el derecho de hacer modificaciones de formato. Además, afirmo que esta cesión no lesiona los derechos de terceros.



Antonio Ruiz Celma

Victoria Vázquez Godoy

Universidad de Extremadura

Alejandro Peña Paredes

Martín Cobos Rodríguez

*Área de Desarrollo Sostenible de la
Diputación de Badajoz*

ANÁLISIS DE LA SENSIBILIDAD ENERGÉTICA DE LAS INSTALACIONES DE ALUMBRADO PÚBLICO EN LOS MUNICIPIOS DE LA PROVINCIA DE BADAJOZ

Resumen

Las instalaciones de alumbrado público juegan un papel fundamental en el desarrollo de la actividad económica de cualquier municipio a la vez que actúan como elemento determinante en la seguridad y el bienestar de los ciudadanos.

Desde el punto de vista energético, el consumo asociado al alumbrado público en los municipios supone entre el 65% y el 80% del consumo eléctrico total con un ratio de 114 €/hab y año según el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE).

La explicación de un consumo tan elevado se encuentra, en general, en el diseño del alumbrado y la antigüedad de muchas instalaciones, lo que conlleva a un aprovechamiento poco eficiente de la energía lumínica generada.

En Extremadura, el sistema de alumbrado público se encuentra integrado por diferentes tipologías de lámparas y luminarias, la mayoría de ellas obsoletas e ineficientes. Es por ello que en la mayoría de los municipios extremeños no se cubren las necesidades lumínicas nocturnas.

Los instrumentos que los Ayuntamientos tienen a su alcance para mejorar este hecho son diversos. Hoy en día, la contratación del suministro y la gestión energética de las instalaciones de alumbrado público a través de empresas de servicios energéticos (ESEs) supone una útil herramienta para lograrlo.

Actualmente, la Excma. Diputación de Badajoz está llevando a cabo un plan de acción en los municipios de la provincia con menos de 20.000 habitantes con el objetivo de cubrir estas necesidades y fomentar el ahorro y la eficiencia energética en las instalaciones de alumbrado público mediante un cambio masivo de tecnología (LED) a través de fondos europeos y fondos propios bajo criterios de protección y conservación del cielo nocturno.

El análisis de la situación actual de las instalaciones de alumbrado público y de los resultados obtenidos de los planes de acción de mejora de la eficiencia energética

permitirá establecer criterios y parámetros de comparación entre las distintas instalaciones de alumbrado público.

Abstract

Street lighting facilities play a fundamental role in the development of the economic activity of any municipality and simultaneously act as a determinant element in the safety and wellness of citizens.

In terms of energy, the consumption associated with street lighting in the municipalities of Extremadura supposes 65-80% of the electrical total consumption with a ratio of 114 €/hab per year according to the IDAE.

The explanation of such a high consumption relies, in general, in the lighting design and the age of many facilities, which leads to an inefficient use of the light energy generated.

In Extremadura, street lighting is composed of different types of lamps and luminaires, most of them obsolete and inefficient. That is why in most municipalities in Extremadura the nightlight needs are not met.

The instruments that City Councils have at their disposal to improve this fact are diverse. Nowadays, contracting the supply and the energy management of street lighting facilities through energy service companies (ESCOs) supposes a useful tool to achieve this.

Currently, Diputación of Badajoz is carrying out an action plan in the municipalities of the province with less than 20.000 inhabitants with the aim of covering these needs and promoting savings and energy efficiency in street lighting facilities through a massive change in technology (LED) through european funds and own funds, under criteria of protection and conservation of the night sky.

The analysis of the current situation of the public lighting installations and the results obtained from the energy efficiency improvement action plans will allow the establishment of criteria and comparison parameters between the different public lighting installations.

Palabras clave: *alumbrado público (street lighting); eficiencia energética (energy efficiency); cielo nocturno (night sky); Badajoz; ahorro energético (energy savings).*

1. Introducción

El alumbrado exterior incluye a toda instalación de iluminación de titularidad pública o privada cuyo flujo luminoso se proyecta sobre un espacio abierto de uso público. Según el Instituto para la Diversificación y el Ahorro de la Energía (IDAE), estas instalaciones totalizan a nivel nacional unos 7.965.000 puntos de luz, con una potencia media de 165 W y cerca de 4.100 horas de utilización anual, lo que representa un consumo de electricidad de 5.370 GWh/año.

En los últimos años, el número de instalaciones y el consumo eléctrico asociado a las mismas ha experimentado un gran crecimiento debido principalmente al desarrollo urbanístico de los municipios.

Al mismo tiempo, las instalaciones de alumbrado exterior han experimentado avances tecnológicos y legislativos que están marcando un punto de inflexión en el tendencial de su consumo. El obligado cumplimiento del RD 1890/2008 por el que se aprueba el Reglamento de Eficiencia Energética en Instalaciones de Alumbrado Exterior (REEIAE), el desarrollo de la tecnología LED y la contratación de Empresas de Servicios Energéticos (ESEs) por las administraciones públicas han marcado en los últimos años un cambio sustancial en el diseño de las instalaciones de alumbrado viario, lo que se traduce en un aumento de la eficiencia energética y en la calidad del servicio en la mayoría de los casos.

Las adaptaciones de las instalaciones de alumbrado público al RD 1890/2008 llevadas a cabo han puesto de manifiesto el elevado potencial de ahorro en el consumo eléctrico que tiene este tipo de instalaciones.

En Extremadura no existía una caracterización del parque de alumbrado público, si bien se han desarrollado puntualmente auditorías energéticas en este campo, principalmente en aquellos núcleos urbanos de mayor población.

En este sentido, el Área de Desarrollo Sostenible de la Diputación de Badajoz está llevando a cabo un plan de actuación global en las instalaciones de alumbrado público en los municipios de menos de 20.000 habitantes de la provincia de Badajoz a través de actuaciones de renovación eficientes bajo el cumplimiento del REEIAE y de las recomendaciones del Comité Español de Iluminación.

En base a dichos estudios, se estima que actualmente el consumo energético asociado a las instalaciones de alumbrado público supone alrededor de un 61% del consumo eléctrico total de los municipios pacenses, mientras que el coste económico asociado supone un 48% del total, tal y como se muestra en la Figura 1.

Por otro lado, la provincia de Badajoz tiene un paisaje celeste extraordinario. La reducida contaminación lumínica, el buen clima y adecuada accesibilidad hacen de ella un sitio ideal para los aficionados a la astronomía. Con los adecuados mecanismos de protección y promoción el territorio puede convertirse en un destino único para la observación del cielo nocturno estrellado.

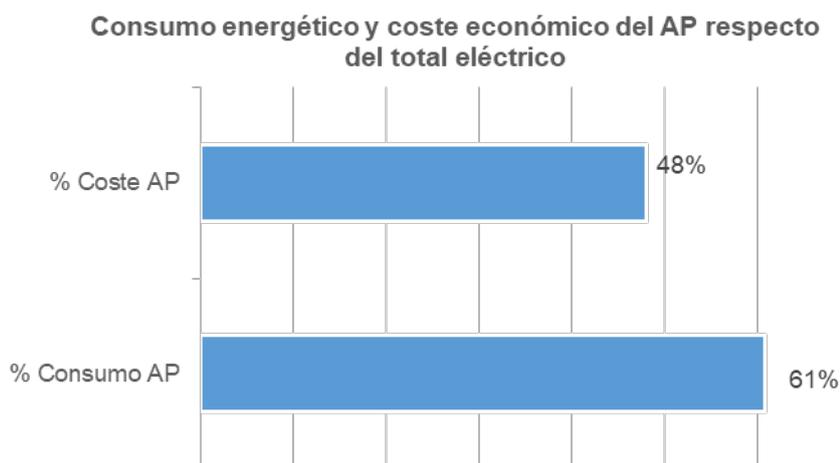


Figura 1. Consumo energético y coste económico asociado al alumbrado público

Si bien la luz artificial constituye un importante catalizador del progreso social y económico de nuestra región, la contaminación lumínica y el uso irracional de la energía suponen un impacto negativo sobre el medio ambiente, por lo que se hace imperativo evitarlos, en la medida de lo posible. En este sentido la eficiencia y el ahorro energético constituyen objetivos prioritarios para la institución provincial.

Los principales campos de actuación propuestos son la reducción de niveles de iluminación elevados, la mejora de la calidad de las luminarias existentes por otras de mayor eficiencia y baja contaminación lumínica, la implantación de sistemas de regulación del flujo luminoso y control de encendidos y apagados de la instalación.

2. Objetivos

El objetivo principal del estudio realizado consiste en establecer una metodología que permita la evaluación y seguimiento de la eficiencia energética de las instalaciones de alumbrado público existentes, así como conocer el potencial de ahorro energético y de protección del medio ambiente en los municipios de la provincia de Badajoz.

Para ello, es necesario conocer su situación actual e identificar los factores sobre los que es posible intervenir para conseguir este objetivo: niveles de iluminación, calidad de sus componentes (luminarias, lámparas, equipos de encendido, sistemas de control, etc.), reducción de la contaminación lumínica (emisión del flujo luminoso hacia espacios ajenos al objeto de iluminación), regulación de encendidos y apagados, telegestión de su mantenimiento y operativa de mantenimiento.

Los datos obtenidos han permitido disponer de un excelente estudio de la situación actual y de la evolución del alumbrado público en los últimos cinco años, al tiempo que se han detectado los puntos fuertes y las oportunidades de mejora de cada municipio estudiado.

La importante inversión prevista por Diputación de Badajoz en el corto plazo afectará a la modificación de al menos el 40% del número de luminarias instaladas en la provincia, lo que pone de manifiesto la importancia en la toma de decisiones técnicas adecuadas y del valor que supone el seguimiento de los parámetros previstos.

Los resultados obtenidos permitirán facilitar el análisis de los alumbrados públicos actuales de los municipios de la provincia de Badajoz y establecer parámetros de calidad que comprueben la disminución del consumo energético y la mejora de los parámetros ambientales que afectan a la iluminación exterior.

3. Metodología

La metodología llevada a cabo para la elaboración del estudio se puede dividir en tres fases:

1. Trabajo de campo: Recopilación de datos del inventariado de las instalaciones de iluminación de una muestra de municipios y pedanías de la provincia de Badajoz. Realización de mediciones lumínicas y de geometría de medidas in situ y con el programa de cálculo DIALUX. En esta primera fase se han definido las decisiones acerca de la calidad de la iluminación existente, del grado de exigencia del RD 1890/2008 y de las necesidades reales de las instalaciones evaluadas.
2. Análisis de los indicadores de alumbrado utilizados actualmente para comparar alumbrados públicos.

3. Análisis técnico, energético y económico de los nuevos sistemas de alumbrado público. Análisis de resultados energéticos y económicos en sustituciones por sistemas con tecnología LED y sistemas eficientes de tecnología convencional con control de la regulación del flujo luminoso.

En la actualidad se ha completado la primera fase, lo que ha permitido obtener un escenario real de la situación actual en la que se encuentran los alumbrados públicos de la provincia de Badajoz.

Según se aprecia en la Figura 2 se han analizado 167 municipios y 23 pedanías de la provincia de Badajoz, con ratios de densidad por superficie que abarca desde 1,28 hab/km² hasta 93,05 hab/km² (Figura 3).

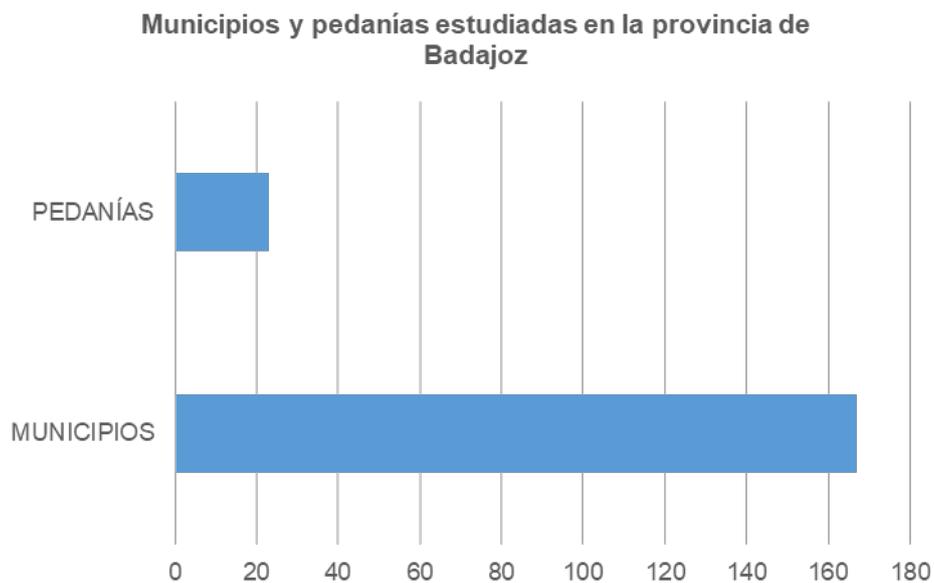


Figura 2. Municipios y pedanías incluidos en el estudio.

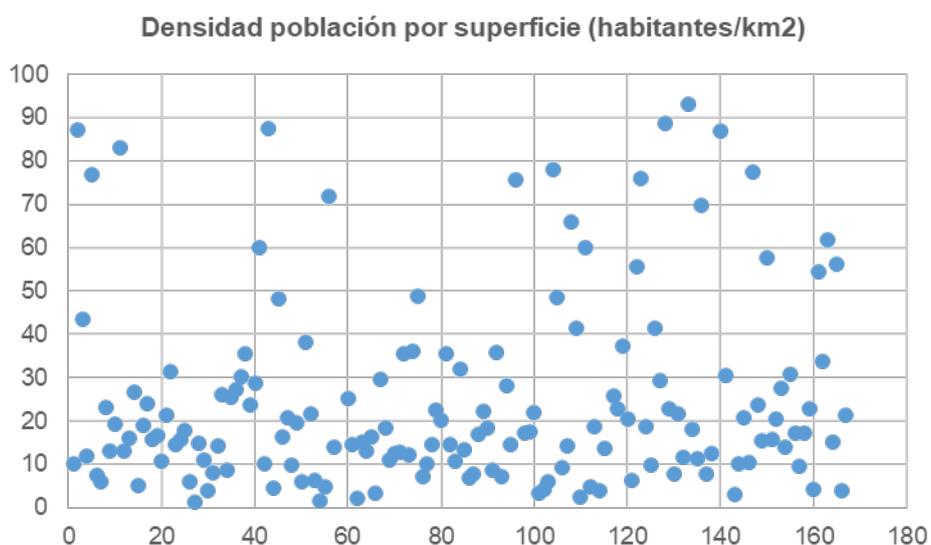


Figura 3. Densidad población por superficie de los municipios estudiados.

4. Resultados

Los resultados obtenidos tras llevar a cabo la primera fase de caracterización e inventario de los alumbrados públicos se detallan a continuación:

- a) En relación al tipo de lámparas instaladas, como se muestra en la Figura 4, un 15,66% son lámparas de vapor de sodio alta presión (VSAP), un 21,10% son lámparas de vapor de mercurio (VM), un 27,24% son lámparas de halogenuros metálicos (HM), un 29,97% son lámparas con tecnología LED y un 6,04% son lámparas de otras tipologías.

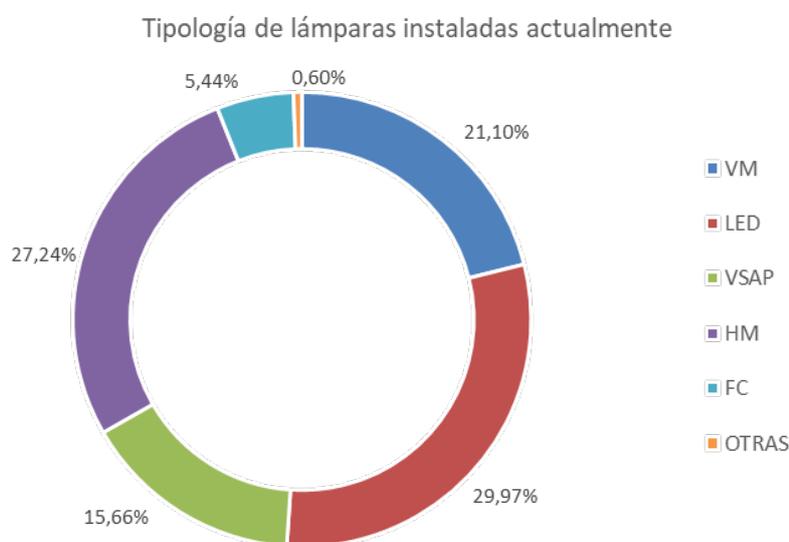


Figura 4: Tipología de lámparas instaladas en la actualidad

- b) La regulación y la telegestión presentan una implantación muy pobre frente al total de potencia instalada, siendo el porcentaje de potencia regulada del 22% aproximadamente y de potencia controlada o telegestionada del 1,5% tal y como se muestra en la Figura 5.



Figura 5: Regulación y telegestión implantada

- c) En valores medios, la antigüedad de las luminarias instaladas está en torno a 17 años y más de 20 años para sus instalaciones. Esta diferencia pone de manifiesto la ejecución por parte de los municipios de la renovación de las instalaciones orientada principalmente a las luminarias y no a las infraestructuras del servicio (cuadros de mando, conductores, soportes, etc.).

En este sentido, cabe destacar la mala praxis llevada a cabo en algunos municipios a la hora de renovar las instalaciones de alumbrado público efectuando modificaciones de luminarias con tecnología convencional por tecnología LED, lo cual, si no se realiza bajo controles adecuados, puede derivar en una disminución de las prestaciones y del rendimiento de la luminaria final.

Esta situación justifica la necesidad de invertir recursos en la renovación del parque de instalaciones con mayor antigüedad.

- d) El consumo energético medio asociado a las instalaciones de alumbrado público de los municipios estudiados es de 143,20 kWh/habitante. Este indicador es especialmente sensible a las características del municipio, obteniendo un valor medio de 157,19 kWh/habitante considerando municipios pequeños (menos de 2.000 habitantes).

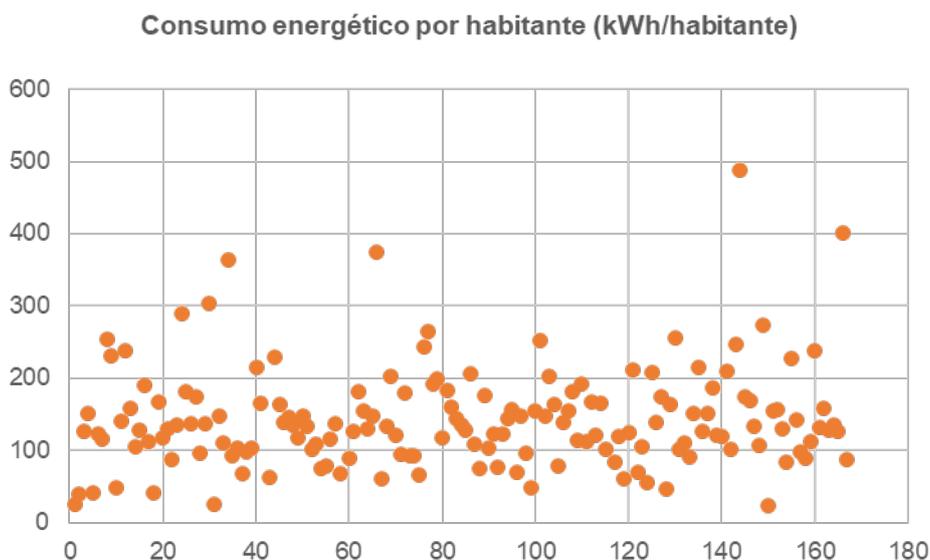


Figura 6: Consumo energético alumbrado público por habitante

- e) En lo que respecta a la tipología de gestión del servicio, tan sólo un 0,03% de los municipios estudiados es realizada por una ESE, siendo gestionado directamente desde el ayuntamiento el 98,7% restante.
- f) En términos económicos, la falta de recursos, tanto técnicos como económicos, de los municipios de menor tamaño, así como la dispersión de los mismos en la geografía de la provincia, ocasiona que al comparar el coste que suponen las instalaciones de alumbrado público, incluyendo las operaciones de mantenimiento, nos encontremos con variaciones superiores al 60% respecto a los municipios grandes.

5. Conclusiones

El estudio de las instalaciones de alumbrado público municipales y el seguimiento de las mismas permitirá establecer una metodología que establezca la evolución de la eficiencia energética de las mismas, facilitando el diseño de una estrategia eficiente en base al potencial de ahorro energético y protección del medio ambiente en los municipios de la provincia de Badajoz.

Estos resultados servirán de base para el establecimiento de parámetros de calidad que comprueben la disminución del consumo energético y el cumplimiento de la normativa vigente, pues será posible realizar comparaciones intermunicipales y realizar un seguimiento en la mejora de la eficiencia energética en las instalaciones de alumbrado público en la provincia de Badajoz.

Se prevé una inversión a corto plazo de 12,5 millones de euros que afectará aproximadamente al 40% de las instalaciones de alumbrado público de los municipios de la provincia de Badajoz.

El ahorro energético asociado se estima en 11.816 MWh/año, lo que supone en términos porcentuales una disminución de las emisiones de CO₂ del 25,2%.

6. Referencias

Inventario, consumo de energía y potencial de ahorro del alumbrado exterior municipal en España (IDAE, 2017).

Iluminando las ciudades (Comisión Europea, 2013).

Más allá de la iluminación. Memoria de Actividades (Anfalum, 2016).

Guía práctica de iluminación de exteriores. Alumbrado eficiente y control de la contaminación lumínica (OPCC-OTPC).

Ley 5/2010 de 23 de junio de prevención y calidad ambiental de la Comunidad Autónoma de Extremadura (Junta de Extremadura).

Correspondencia (Para más información contacte con):

Nombre y Apellido: M^a Victoria Vázquez Godoy
Teléfono: +0034 667 06 24 58
E-mail: vivivago@hotmail.com

Cesión de derechos

Por la presente, y como autor del trabajo mencionado arriba, cedo al Palacio de Ferias y Congresos de Málaga una licencia no-exclusiva irrevocable para imprimir, reproducir, distribuir, transmitir o comunicar de cualquier manera dicho trabajo, incluyendo el derecho de hacer modificaciones de formato. Además, afirmo que esta cesión no lesiona los derechos de terceros.



Inés Aragüez del Corral
Moisés Garrido Martín
Montajes Eléctricos Cuerva S.L.

NUEVO MODELO DE CENTRO DE TRANSFORMACIÓN SUBTERRÁNEO INTELIGENTE, ADAPTADO A LAS SMART CITIES Y AL CAMBIO CLIMÁTICO

Resumen

Las smart grids se enfrentan al reto de disponer de un nodo inteligente que permita la gestión de la red de distribución. Este no puede ser otro que los centros de transformación, como nodo energético al que llegan las redes de media tensión de las subestaciones y de donde parten las redes en baja tensión que alimentan a los consumidores, y como nodo en la arquitectura de comunicaciones necesaria para el control inteligente de la red.

Hay que destacar que es fundamental que estos elementos consigan una mayor fiabilidad, seguridad y una mejor continuidad de suministro en caso de catástrofes (inundaciones, incendios, terremotos, ...) No se puede olvidar que en estas situaciones de emergencia, conseguir que la red eléctrica de distribución siga funcionando, y que lo haga de forma inteligente, es fundamental para poder alimentar los servicios críticos, como pueden ser comunicaciones, centros sanitarios, sistemas de bombeo,... ayudando a conformar lo que se denomina “ciudades resilientes”.

También es importante considerar que la ubicación de nuevos centros de transformación en núcleos urbanos consolidados es cada vez más difícil. Este efecto se va a ver acentuado aún más si se prevé la incorporación del vehículo eléctrico como medio habitual de movilidad urbana, ya que esto va a suponer un aumento considerable de la potencia instalada.

Se propone un nuevo modelo de centro de transformación subterráneo e inteligente que, con un diseño innovador, sea capaz de resolver estos problemas. Este modelo propuesto cuenta con una envolvente metálica cilíndrica que le confiere una mayor resistencia ante grandes esfuerzos exteriores, manteniendo su estanqueidad ante inundaciones y las acciones propias de movimientos sísmicos. En su interior se dispondrá toda la aparatada, con accionamientos motorizados, dispondrá de relés de protección y sensores de parámetros de control. Todo el sistema se controla desde una centralita que se sitúa en un cofre estanco y resistente exterior. Desde esta centralita se podrán gestionar todos los accionamientos, comprobar el estado de conexión y desconexión de cada uno de éstos y conocer los parámetros de funcionamiento de los equipos. También, la centralita permitirá almacenar un histórico de maniobras realizadas y accesos permitidos mediante sistema big data con almacenamiento de información en la nube. Este sistema también permitirá la posibilidad de una telegestión desde un centro de control o a través de una APP (aplicación)

para dispositivos móviles, permitiendo la incorporación de este equipo en otro de gestión integral inteligente o smart grids. Además, va a permitir una mejor gestión del mantenimiento y una explotación de la red más eficiente.

Para solventar la evacuación de calor de la cuba del transformador, se modifica el diseño convencional de aletas adosadas a la cuba por un nuevo diseño basado en instalar intercambiadores en el exterior y mediante unos colectores en la cuba que permitirán hacer circular el aceite refrigerante mediante una bomba. Para una total mimetización del centro, este intercambiador se instalará sustituyendo parte del bordillo del acerado. De esta forma, el centro queda totalmente estanco y resistente a cualquier tipo de inundación, tsunami o avenida. Además, este sistema de refrigeración, más eficiente, unido a la ausencia de rejillas, va a aumentar la durabilidad de los componentes y su vida útil.

Se concluye que el uso de este innovador modelo de centro de transformación va a conseguir que las infraestructuras eléctricas de las ciudades seas más resistentes y operativas, permitiendo afrontar los grandes retos del futuro que van a traer la revolución digital, los vehículos eléctricos y el cambio climático.

Abstract

Smart grids face the challenge of having an intelligent node that allows the management of distribution network. This one can not be other than transformer stations, as an energetic node where high voltage grid get to, and where distribution grid come out in low voltage for consumers, and as a node in the communications architecture, necessary for the intelligent control of the network.

It should be noted that it is important that these energy and communication nodes achieve greater reliability, security and a better continuity of supply in case of catastrophes (floods, fires, earthquakes, ...). It can not be forgotten that in these emergency situations, getting the distribution grid working is essential to be able to supply critical services, such as communications, hospitals, pumping systems, ... helping to create what is called "resilient cities".

It is also important to consider that the location of new transformer stations in consolidated urban centres is increasingly difficult. This effect will be accentuated even more if the incorporation of the electric vehicle as a usual means of urban mobility is taken into account, since this will mean an increase in the installed power of the distribution grid.

A new model of underground smart transformer station is proposed, which, with an innovative design, is capable of solving these problems. The proposed model has a cylindrical metallic envelope, giving it a greater resistance to external forces while keeping its watertightness against floods and forces characteristic of seismic movements. Within the inside, all the switchgear is available, with motorized drives. It will have protection relays and sensors to control parameters. All the system is managed by a control unit which is located in a tight and resistant exterior box. From this control unit, all the elements can be managed, checking the connection status of each one and knowing the operating parameters of the equipment. Also, the control unit will enable to store a data history of performed operations and granted accesses by big data and Cloud Computing technologies. The system will also allow the possibility of a remote management from a control station or through an APP (application) system for mobile devices, allowing the incorporation of this equipment in another intelligent integrated one or smart grids. In addition, it will allow a better maintenance management and a more efficient operation of the network.

With the purpose of solving the heat evacuation of the transformer tank, the conventional fin design of the tank is modified by a new design based on installing exchangers on the outside and by means of collectors in the tank that will allow the refrigerant oil to circulate with a pump. In order to make the station invisible, this exchanger will be installed replacing part of the curb on the sidewalk. In this way, the station is totally sealed and resistant to any type of flood or tsunami. In addition, this cooling system, more efficient, and an envelope without openings, will increase durability of components and their useful life.

It is hereby concluded that the use of this innovative transformer station model will make electrical infrastructures of cities more resistant and operational, enabling them to face the great challenges of the future brought by the digital revolution, electric vehicles and climate change.

Palabras clave: smart cities; smart grids; red de distribución; resiliencia urbana; cambio climático; centro de transformación

Keywords: smart cities; smart grids; electrical distribution grid; urban resilience; climate change; transformer station

Área temática: Actuaciones sostenibles del espacio urbano.

1. Introducción

Los centros de transformación deben albergar los elementos de control automático necesarios para permitir que, desde ellos, se pueda interactuar en las redes de alta y baja tensión. Este sistema así creado va a conseguir una adecuada gestión de las redes de distribución, permitiendo que éstas conformen una smart grid que proporcione nodos de energía y comunicación que puedan ser controlados mediante un sistema inteligente de la red.

Los centros que se pueden encontrar en el mercado actual, por su geometría, materiales de construcción y el sistema de ventilación empleado, son muy vulnerables en caso de inundaciones, tsunamis, terremotos, etc. La presente propuesta trata de, olvidando los criterios de diseño existentes y de una manera objetiva, estudiar la implantación de un nuevo modelo que propicie una mayor seguridad y una mejor continuidad de suministro en caso de catástrofes naturales y efectos del cambio climático (inundaciones, incendios, terremotos,...), dotándolo de sistemas que lo hagan resistente ante estas situaciones (resiliencia urbana).

Tampoco se puede obviar que en las grandes ciudades es muy difícil ubicar nuevos centros de transformación, y aún más si se prevé la incorporación del vehículo eléctrico como medio habitual de movilidad urbana, con su correspondiente aumento de potencia instalada, por lo que es importante adoptar nuevos diseños que permitan disponer estos nuevos centros en aquellos lugares donde sea importante el impacto visual y en donde no exista suelo libre para ubicar las casetas tradicionales.

2. Retos para el futuro

2.1. Resiliencia urbana ante catástrofes

El cambio climático nos aboca a tener que prever que las ciudades se enfrenten a una climatología más adversa de lo usual, además de las catástrofes habituales de origen

geológicos (terremotos, tsunamis, ...), hay que añadir inundaciones, desbordamientos de ríos, grandes incendios forestales, aumentos del nivel del mar, etc.

Los centros de transformación convencionales son muy vulnerables ante este tipo de siniestros, quedando inutilizados y provocando grandes apagones que se prolongan en el tiempo por la dificultad que entraña sus reparaciones.

Las autoridades locales dan cada vez mayor importancia a que, en caso de siniestros, la red eléctrica siga funcionando para conseguir que los equipos básicos y urgentes se mantengan operativos (servicios sanitarios, hospitales, comunicaciones, abastecimiento de agua, sistemas de bombeo, y un largo etcétera) (Resccue, 2018). De esta manera, se va a ayudar a conseguir que la recuperación ante cualquier catástrofe sea más rápida y, sobre todo, reducir el número de víctimas. “Invertir un dólar en prevención de desastres tiene un retorno de 130 dólares” (El Confidencial, 2013)¹.

2.2 Ciudades con climatología o condiciones adversas

En zonas desérticas la existencia de tormentas de arena es una problemática que merece una mención especial, ya que, por su gran cantidad y su pequeña granulometría va a penetrar por todos los huecos de los equipos colapsando el sistema en muy poco tiempo.

También hay que destacar que en aquellos lugares en los que la temperatura ambiental es muy alta, la refrigeración del transformador mediante convección natural se dificulta enormemente por el pequeño salto térmico existente entre la temperatura exterior y la temperatura de trabajo de la máquina. Esto provoca problemas en el funcionamiento y disminuye en gran medida el rendimiento del transformador. (Aragüez, 2016b)

2.3 Integración de la red de distribución en sistemas smart grids

Cada vez más se están configurando lo que se ha dado en llamar ciudades inteligentes (smart cities), y como figura fundamental, las redes eléctricas inteligentes (smart grids). Para poder configurar redes inteligentes es necesario disponer elementos que puedan ser gestionados mediante un sistema programable. Este sistema ha de recoger valores de sensores existentes y poder mandar señales de actuación de acuerdo con los algoritmos planteados. Los centros de transformación son los elementos donde se pueden implementar estos sistemas de control, y propiciar así una adecuada integración de la red en el conjunto de una gestión más general.

2.4. Integración de los centros de transformación en el entorno urbano

La ubicación de nuevos centros de transformación en las ciudades plantea serios problemas urbanísticos, ya que situar centros de superficie va a chocar con las figuras de protección de centros históricos y de integración urbana e incluso, posibles problemas de contaminación por campos eléctricos y magnéticos o ruidos y vibraciones. Pensemos en centros turísticos, de alto valor comercial, históricos, de alta densidad de población, etc.

Si se plantea el uso de locales comerciales, resulta inviable por ser prohibitivo, dado su alto valor económico.

¹ https://www.elconfidencial.com/ultima-hora-en-vivo/2013-12-17/invertir-un-dolar-en-prevencion-de-desastres-tiene-un-retorno-de-130-dolares_126327/

La ubicación de centros de transformación subterráneos convencionales no es una solución completa ya que hay que disponer de antiestéticas chimeneas de ventilación equipadas con rejillas de ventilación.

2.5. Implantación de los vehículos eléctricos

La paulatina incorporación de los vehículos eléctricos presenta un horizonte en el que, a largo plazo, entorno a un 40% del parque automovilístico va a ser de tracción eléctrica y, por lo tanto, se va a demandar una potencia instalada en redes de distribución del orden de un 35% superior a la existente. Esto va a conllevar la necesidad de instalar nuevos centros de transformación, sobre todo, en zonas de mayor densidad urbana. (Aragüez, 2016b) (REE, 2018)

2.6. Mayor seguridad laboral

La manipulación directa de los interruptores existentes en el centro de transformación (en alta y en baja tensión) es una práctica habitual y cotidiana pero que ha provocado multitud de accidentes, ya que si existe un cortocircuito no detectado puede ocasionar una proyección de metal fundido que provoque graves quemaduras en el operario.

Por otro lado, la manipulación directa del aparellaje en alta tensión puede provocar la electrocución por contacto accidental del operario con alguna zona en tensión en el espacio confinado del centro de transformación.

En caso de que se esté reparando un tramo de red, puede ocurrir que, por error, se conecte dicho tramo pudiendo provocar un accidente en las personas que en ese instante están trabajando.

2.7. Seguridad ante incendios

Puede ocurrir que un fallo en el bobinado del transformador o una deficiente refrigeración provoque un incendio de la máquina que, teniendo en cuenta el gran volumen de aceite presente en la cuba, puede tener una magnitud importante. Este riesgo se agrava si el centro de transformación ocupa un local de un edificio de viviendas u oficinas. En ese caso, al problema propio de las llamas, hay que unir el hecho de la gran cantidad de humo que emite este tipo de incendios.

2.8. Presencia de polvo, insectos y roedores

La presencia de rejillas de ventilación va a hacer que en el interior de los centros de transformación se acumule polvo sobre los elementos en tensión. Este polvo en condiciones de humedad ambiental alta puede volverse conductor y provocar averías.

Por otro lado, estas rejillas van a ser el lugar por donde penetren animales que aniden en el interior del centro, e incluso, que deterioren los aislamientos, provocando, igual que en el caso anterior, graves averías.

3. Propuesta de solución

En este artículo se plantea la implantación de un nuevo modelo de centro de transformación, analizando pormenorizadamente las ventajas que éste va a suponer sobre los convencionales. En este modelo propuesto (Aragüez, 2016a), de tipo subterráneo y totalmente estanco, todos los equipos se han diseñado, calculado y simulado mediante software específicos (Aragüez, 2016b), usándose estándares europeos en general, y la normativa española, en particular (RD 337/2014). En el caso de que este modelo se

implante en otros países, se deberá estudiar la adaptación a la normativa local correspondiente.

3.1 Envoltente

La envoltente consiste en un cilindro de acero con virola a ambos lados, como se ve en la figura 1. Se escoge esta tipología geométrica ya que presenta dos grandes ventajas:

- El cilindro es una figura geométrica que se comporta mejor ante los posibles empujes del terreno.
- La forma constructiva, por medio del curvado de chapa, hace que sólo presente un único cordón de soldadura en la generatriz del cilindro (aparte de los necesarios para los casquetes extremos). De esta manera, los posibles puntos de corrosión se reducen al mínimo.

Este cilindro se protege mediante revestimiento exterior de PRFV (poliéster reforzado con fibra de vidrio), para evitar problemas de corrosión, y se dota de dos tapas para el paso de personas (zona de alta tensión y zona de baja tensión) y una tercera, de mayor dimensión, para el montaje y desmontaje del aparellaje. Los extremos se sellan con tapas atornilladas a las virolas y juntas elásticas. El conjunto se fija sólidamente a una solera armada que se dispone en el fondo de la excavación.

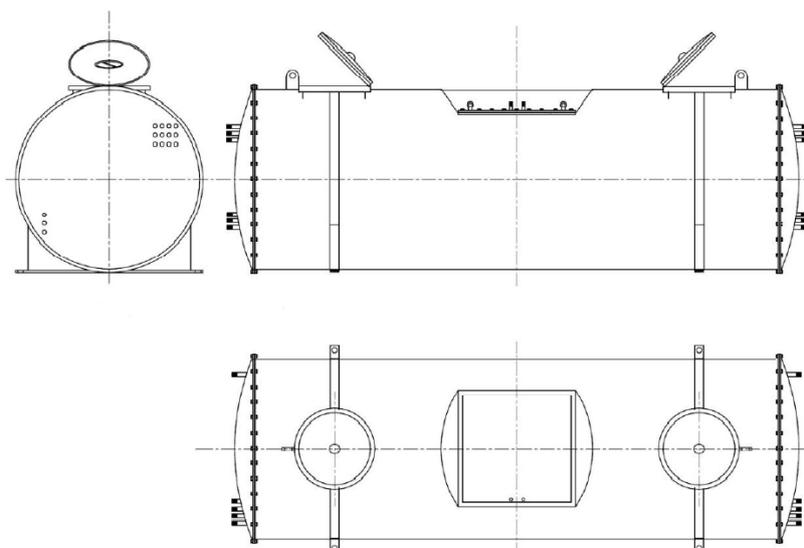


Figura 1: Detalle de envoltente del centro de transformación

3.2 Aparellaje

Se concibe este centro de transformación con la mínima necesidad de acceder a su interior, para lo cual se realizan las siguientes modificaciones en los aparellajes usuales (ABB, 2004):

- Se dotan de motorización de conexión y desconexión a todos los interruptores de las celdas de alta tensión (Capella, 2000). Los elementos se calculan de acuerdo a la reglamentación correspondiente. (RD 223/2008).

- La protección del transformador se realizará mediante relé magnético y térmico, regulable según potencia del transformador, que accionará el interruptor motorizado correspondiente (ABB, 2004).
- Las salidas en baja tensión se dotarán de interruptores automáticos en caja moldeada con motor de conexión y desconexión. Su calibre y regulación se ajustará a la sección de conductor empleado. Los elementos se calculan de acuerdo a la reglamentación correspondiente. (RD 842/2002).
- La conexión transformador – cuadro de baja tensión se realiza mediante pletinas, suprimiéndose los haces de conductores de enlace habituales.

En la figura 2 se comprueba la disposición de estos elementos.

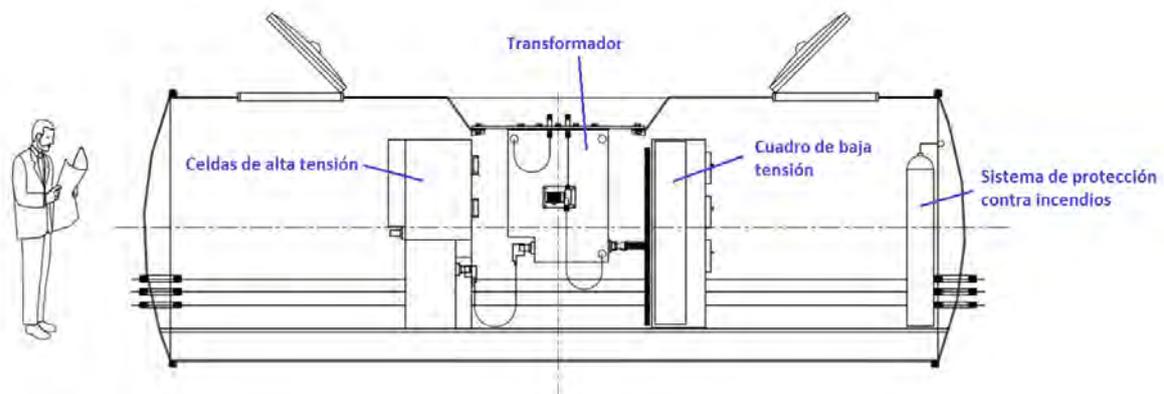


Figura 2: Sección longitudinal del centro de transformación propuesto

3.3 Transformador

Sobre el transformador estándar (Avelino, 1998) (Schneider Electric, 2014) se realizarán las siguientes modificaciones (UNE-EN 60076-1, 2013):

1. Supresión de las aletas de ventilación y ruedas de transporte
2. Instalación y girado de conos de conexión de alta tensión y giro de 90° de las pletinas de salida en baja tensión.
3. Colocación de colectores interiores para la recirculación externa del aceite refrigerante
4. Colocación de vainas para instalación de detectores de temperatura y presión. Instalación de una tapa superior sobredimensionada para que sirva como tapa de la arqueta de montaje del centro.

Como se puede ver en la figura 3, el conjunto del transformador queda girado 180° de manera que las tomas se sitúan en la parte inferior.

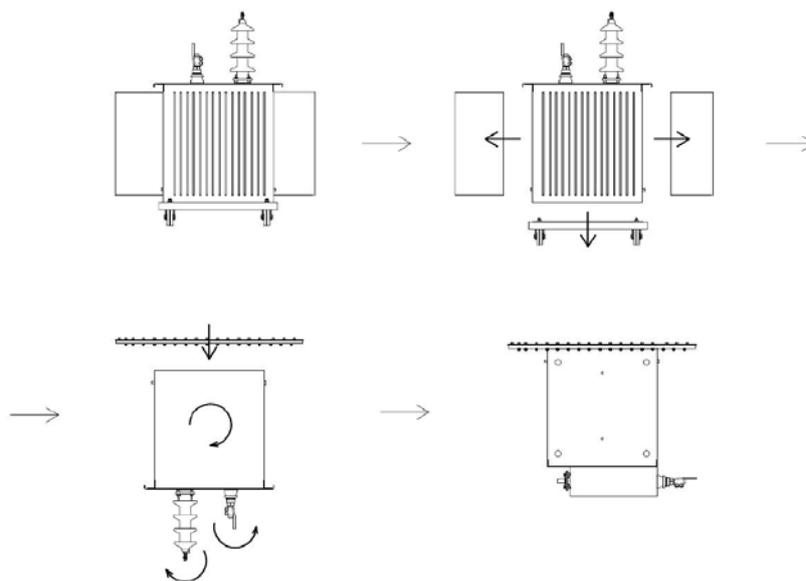


Figura 3: Transferencia desde transformador estándar a transformador propuesto

3.4 Refrigeración del transformador

Para la correcta evacuación del calor generado en el transformador se dispondrá un intercambiador de calor externo compuesto de tubos horizontales y placas disipadoras de calor. Para el diseño y cálculo de los elementos de este sistema de evacuación de calor se emplean normas europeas (UNE-EN 50216-10, 2010) (UNE-EN 60076-2, 2013) (UNE-EN 60076-7, 2012). El intercambiador se instalará sólidamente anclado en el interior de una carcasa metálica ventilada, sustituyendo parte del bordillo del acerado. De esta forma se consigue que este elemento quede totalmente mimetizado en el entorno y no tenga impacto visual una vez instalado.

La circulación del fluido se realizará mediante bomba circuladora accionada desde la centralita de control (UNE-EN 60296, 2012).

3.5 Sistema de refrigeración alternativa

Como sistema de refrigeración alternativo al anteriormente propuesto, y para aquellos casos en los que las temperaturas ambientales extremas hagan difícil el correcto intercambio de calor (Gao, Li, Li, 2011), se ha ideado un sistema alternativo a base de máquina frigorífica. En este caso, se dispone intercalado en la parte superior del transformador, una red de tubos que actúa como unidad evaporadora, y una máquina condensadora cuyo serpentín se dispone en el exterior del recinto. El funcionamiento de esta unidad garantiza el perfecto enfriamiento de la máquina e incluso, un subenfriamiento de su temperatura de trabajo que va a propiciar un aumento de la potencia disponible del transformador (Aragüez, 2016b) (Sacchi, Rifaldi, 1989) (UNE-IEC/TS 60076-14, 2010).

En la figura 4 se comprueba el diseño realizado para el evaporador, de manera que se pueda acoplar fácilmente al transformador propuesto.

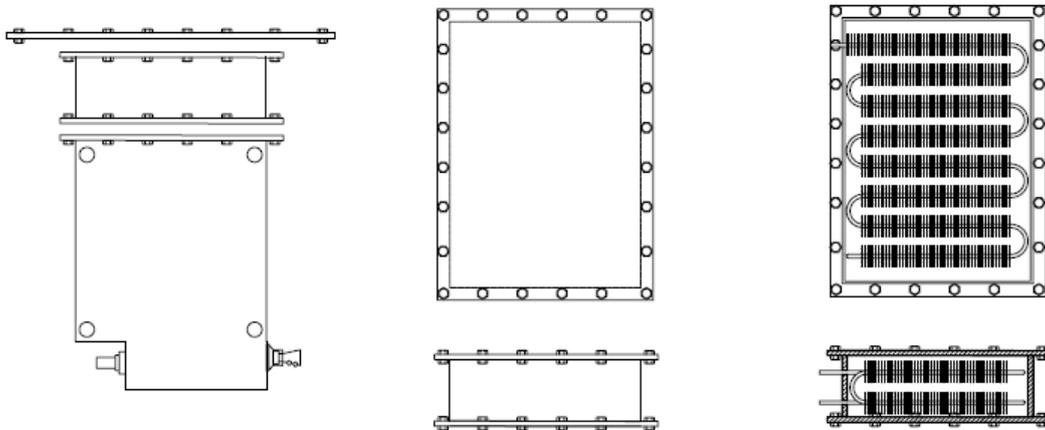


Figura 4: Diseño de nuevo evaporador acoplable al transformador

3.6 Protección contra incendios

El conjunto se dota de un sistema de protección contra incendios por inundación total de gas inerte. En el interior se disponen las bombonas de gas, las toberas y los detectores de temperatura. En caso de incendios, y de una manera temprana, éste quedaría totalmente sofocado por la acción del gas.

3.7 Centralita de control

Se prevé un funcionamiento del conjunto totalmente autónomo y una maniobra del aparellaje por accionamiento remoto, es decir, el conexionado o desconexión de los interruptores de alta y baja tensión se realizará desde la centralita exterior o, incluso, desde una central dispuesta en otro lugar diferente, mediante la adopción de la codificación de telegestión de red que cada empresa suministradora de energía eléctrica disponga.

A esta centralita se canalizarán, así mismo, las señales de las sondas de temperatura de la máquina, el estado de disparo del sistema contra incendio, y otras señales que resulten interesantes para la explotación del centro (temperatura ambiente del interior, existencia de vertidos en el fondo de la cuba, etc.). También, esta centralita registrará todas y cada una de las maniobras realizadas, tanto en los disyuntores de alta tensión como en los interruptores automáticos de baja tensión. De esta forma, quedará registrado el elemento accionado, el dato temporal y el nombre o código de la persona o sistema que ha efectuado la orden. Además, se mantendrá un sistema de protocolos de prioridad para cada actuación.

La centralita contará con una pantalla táctil de información y control, además se podrá acceder al sistema desde cualquier dispositivo móvil autorizado con clave de acceso.

Todos estos datos serán gestionados por un sistema big data, con almacenamiento de información en la nube.

En la figura 5 se puede ver, en sección constructiva, el centro de transformación totalmente instalado y la disposición de la centralita de control exterior.

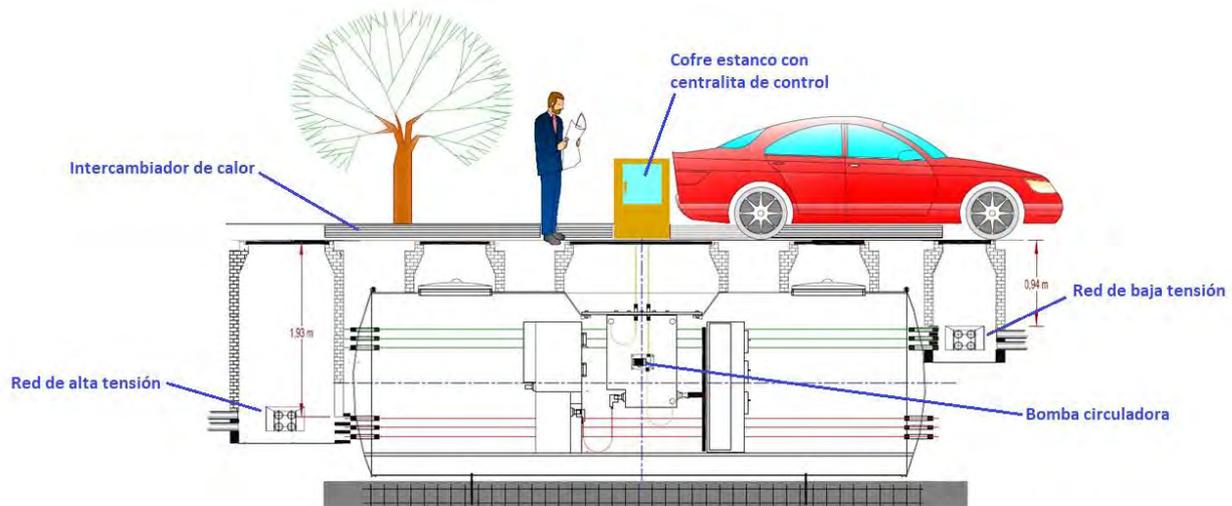


Figura 5: Vista del centro de transformación instalado

4. Análisis de la propuesta

El disponer de un diseño totalmente estanco consigue que el centro de transformación pueda seguir operativo incluso en aquellos casos en que, por grandes inundaciones, desbordamientos de ríos, etc. exista un nivel de agua permanente por encima de él. En este caso, el sistema de evacuación de calor sigue funcionando ya que la transferencia de calor en el intercambiador se asegura por el contacto de las placas con el agua (todo el sistema eléctrico queda en el interior del centro que permanece seco y la unidad de control también en su cofre exterior estanco).

Esta característica que se ha indicado en el párrafo anterior hace idóneos a estos centros de transformación para funcionar en aquellos países que por su climatología extrema lo hacen muy proclive a soportar grandes inundaciones y desbordamientos de ríos (zonas monzónicas, climas tropicales, ...) y también en aquellos países litorales donde el riesgo de tsunamis es importante. Hay que insistir en que ante estas catástrofes es fundamental mantener el suministro eléctrico para atender a los servicios básicos de seguridad, sanidad, comunicaciones, abastecimiento de agua, etc.

Ante un terremoto, el centro de transformación es estable ya que no tiene estructuras que puedan desmoronarse. Incluso en el caso de desplome de edificios sobre él, el sistema puede seguir operativo ya que la capa de terreno superficial va a amortiguar y minimizar los daños interiores. Además, la estructura cilíndrica de la envolvente hace al sistema especialmente resistente a los esfuerzos que el terreno ejerza sobre él. Esto lo hacen ideal para aquellos países o regiones en las que el índice sísmico es elevado.

El modelo va a tener una afección mínima ante un gran incendio que se produzca en algún inmueble cercano, ya que, por las propiedades aislantes del propio terreno, la temperatura del interior de la instalación no va a sufrir un incremento importante. Por otro lado, ha tenerse en cuenta que el desarrollo de las llamas es siempre ascendente.

Otra ventaja de este diseño es que la ausencia de rejillas de ventilación impide el acceso de insectos, roedores, polvo, suciedad, ... que puede provocar riesgo y accidentes. Además, la estanqueidad del conjunto hace idóneo este sistema para aquellos lugares donde pueda existir una alta concentración de polvo en suspensión (por ejemplo, zonas saharianas, de

oriente medio y aquellos lugares donde puedan existir tormentas de arenas que puedan afectar a la red eléctrica).

Como se indica en el apartado 2.5, la paulatina implantación del vehículo eléctrico va a suponer la necesidad de ampliar la potencia disponible en las redes de distribución y por lo tanto, un aumento del número o la potencia de los centros de transformación urbanos. Esto lleva al complejo problema de ubicación de los nuevos centros de transformación. El diseño que se plantea soluciona este inconveniente ya que se ubican las nuevas estaciones bajo los viales u otras zonas públicas. También, como se ha expuesto anteriormente, con este modelo se evita disponer de antiestéticas construcciones en centros urbanos de alto valor turístico u ocupar locales de alto valor económico en zonas comerciales.

Por otro lado, el sistema propuesto permite, por su modularidad que, en caso de demandarse mayores potencias, puedan acoplarse unas unidades a otras para cubrir la demanda necesaria, como se observa en la figura 6.

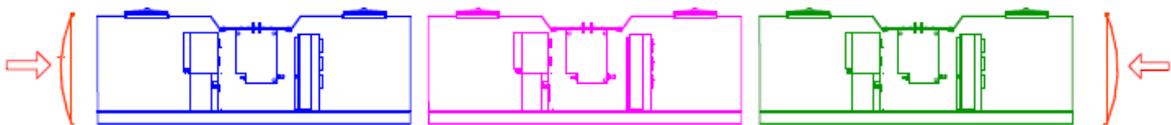


Figura 6: Posibilidad de acoplamiento entre módulos

Como se puede ver en la figura 7, es fácil el montaje del centro de transformación, e incluso la retirada o sustitución de cualquiera de los elementos interiores. Para ello se necesita tan sólo un camión equipado con una pluma. Por otro lado, también es muy fácil sustituir un transformador averiado por otro nuevo o por otro de mayor potencia. En todos estos casos se utiliza la trampilla central de montaje.

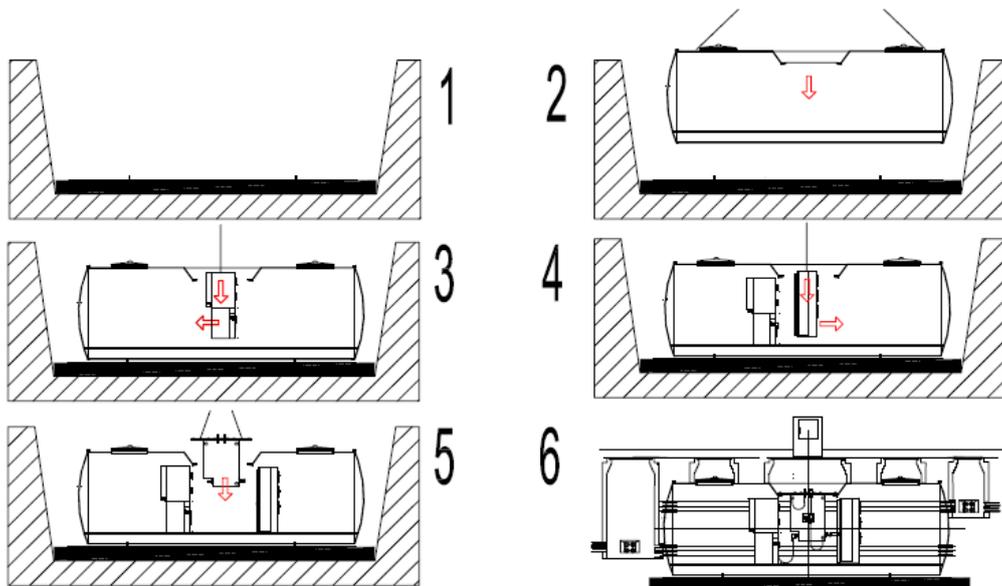


Figura 7: Proceso de puesta en obra del sistema

Por último, la sustitución de los fusibles por los interruptores automáticos presenta una serie de ventajas que se detallan a continuación:

- Aumento de la capacidad de las redes. Posibilidad de ajuste de la intensidad de disparo a la intensidad admisible del cable.
- Repuestos. Con los interruptores automáticos no es necesario mantener un stock de fusibles para reponer los deteriorados.
- Automatización del accionamiento.
 - Seguridad: El accionamiento desde un lugar remoto hace imposible los accidentes por descargas o quemaduras al accionar interruptores.
 - Control: Este tipo de elementos permiten la introducción de las redes de distribución en sistemas de gestión inteligentes (smart grids) desde una central de mando.
 - Seguridad contra incendios: El accionamiento desde un lugar externo al centro de transformación permite disponer de un sistema de extinción de incendios por inundación total del recinto.

Como se puede ver, el modelo propuesto presenta una gran cantidad de ventajas frente a los centros existentes, además, la diferencia de precio no es excesiva, del orden de un 20% más que un centro de transformación subterráneo convencional, sin embargo, las prestaciones son mucho mayores. (Aragüez, 2016b)

5. Conclusiones

Se puede afirmar que el diseño de los centros de transformación ha variado poco a lo largo de los años, se sigue usando un sistema de ventilación natural mediante rejillas, una máquina transformadora con aletas disipadoras de calor, accionamientos que en la mayoría de los casos son manuales y una envolvente poco resistente ante acciones externas. Si comparamos esta evolución con la existente en cualquier otro sector de bienes de equipo, donde la automatización y la transformación digital ha modificado sustancialmente los productos para hacer que su uso sea más fácil, eficaz e integrable, se puede llegar a la conclusión de que es necesario profundizar en la innovación de los centros de transformación.

Como ya se ha mencionado anteriormente, hay que tener presente lo importante que es mantener el suministro eléctrico, tanto en situaciones de normalidad como ante cualquier catástrofe. Se ha podido constatar, por ejemplo, por las recientes inundaciones en EEUU, que, cuando se produce una catástrofe natural que afecta a las grandes ciudades (inundaciones, terremotos, tsunamis, desbordamientos de ríos, etc.) las infraestructuras y, sobre todo las instalaciones eléctricas de distribución son de las primeras que se ven afectadas. Es importante que el sistema eléctrico quede blindado ante estas situaciones, ya que va a permitir que sigan en uso las infraestructuras críticas para reducir el número de víctimas y conseguir una mayor rapidez en la recuperación de la normalidad.

La innovación que se propone lleva aparejada una mayor seguridad en el uso de las instalaciones, tanto para el personal de mantenimiento como para el resto de ciudadanos, además, la creciente utilización de tecnologías de internet of things en todo lo cotidiano y la incorporación de las smart grids hacen difícil de concebir la existencia de centros de transformación sin que incorporen este tipo de sistemas.

Hay que insistir en la necesidad de aumento de potencia eléctrica instalada en un futuro próximo debido a la progresiva implantación de los vehículos eléctricos y que los estándares de seguridad y continuidad de suministro han de ser cada vez más severos.

Se considera que con este innovador modelo de centro de transformación propuesto se contribuye a intentar resolver algunos de los problemas a los que se enfrentan las ciudades del futuro.

6. Referencias

ABB (2004). Manual Técnico de Instalaciones Eléctricas. Tomo I: Aparatos de protección y maniobra. Bergamo: ABB SACE.

ABB (2004). Manual Técnico de Instalaciones Eléctricas. Tomo II: La instalación Eléctrica. Bergamo: ABB SACE.

Aragüez del Corral, I. (2016). Centro de transformación modular subterráneo resistente a catástrofes y condiciones adversas. ES 1153658Y.

Aragüez del Corral, I., Aguado Sánchez, J. and Ruiz Aranda, J. (2016). Nuevas tecnologías constructivas en el diseño de centros de transformación de distribución en el medio urbano. Ingeniería Industrial. Universidad de Málaga.

Avelino Pérez, P. (1998). Transformadores de distribución: Teoría, cálculo, construcción y pruebas. México: Reverté.

Capella, R. (2000). Centros de transformación MT/BT. Barcelona: Schneider Electric España S.A.

Gao, M., Li, G. and Li, J. (2011). The temperature dependence of insulation characteristics of transformer oil at low temperatures. Power Engineering and Automation Conference (PEAM), 2011 IEEE.

Real Decreto 223/2008, de 15 de febrero, por el que se aprueban el Reglamento sobre condiciones técnicas y garantías de seguridad en líneas eléctricas de alta tensión y sus instrucciones técnicas complementarias ITC-LAT 01 a 09. I. Disposiciones generales. España.

Real Decreto 337/2014 de 09/05/2014, por el que se aprueban el Reglamento sobre condiciones técnicas y garantías de seguridad en instalaciones eléctricas de alta tensión y sus Instrucciones Técnicas Complementarias ITC-RAT 01 a 23. I. Disposiciones generales. España.

Real Decreto 842/2002, de 2 de agosto, por el que se aprueba el Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión e Instrucciones Técnicas Complementarias. I. Disposiciones generales. España.

RESCCUE (2018). RESilience to cope with Climate Change in Urban arEas – a multisectorial approach focusing on water. Bristol, Reino Unido: Resccue. Recuperado de <http://www.resccue.eu/resccue-project>

REE (2018). Simulador de recarga del vehículo eléctrico. Madrid, España: Red Eléctrica de España. Recuperado de <http://www.ree.es/sites/all/SimuladorVE/>

Sacchi, J. and Rifaldi, A. (1989). Cálculo y diseño de máquinas eléctricas. Buenos Aires: Universidad Nacional de La Plata.

Schneider Electric (2014). El transformador y su entorno, para una protección máxima. (2014). Barcelona: Schneider Electric España S.A.

UNE-EN 50216-10:2010 Accesorios para transformadores de potencia y reactancias. Parte 10: Intercambiadores de calor aceite-aire.

UNE-EN 60296:2012. Fluidos para aplicaciones electrotécnicas. Aceites minerales aislantes nuevos para transformadores y aparata de conexión.

UNE-EN 60076-1:2013 Transformadores de potencia. Parte 1: Generalidades.

UNE-EN 60076-2:2013 Transformadores de potencia. Parte 2: Calentamiento de transformadores sumergidos en líquido.

UNE-EN 60076-7:2012 Transformadores de potencia. Parte 7: Guía de carga para transformadores de potencia sumergidos en aceite.

UNE-IEC/TS 60076-14:2010. Transformadores de potencia. Parte 14: Diseño y aplicación de transformadores de potencia sumergidos en líquido aislante utilizando materiales aislantes de alta temperatura

Correspondencia (Para más información contacte con):

Nombre y Apellido: Inés Aragüez del Corral
Teléfono: +34665882316
E-mail: inesaraguez@gmail.com

Cesión de derechos

Por la presente, y como autor del trabajo mencionado arriba, cedo al Palacio de Ferias y Congresos de Málaga una licencia no-exclusiva irrevocable para imprimir, reproducir, distribuir, transmitir o comunicar de cualquier manera dicho trabajo, incluyendo el derecho de hacer modificaciones de formato. Además, afirmo que esta cesión no lesiona los derechos de terceros.



11

Rami D. Orejón-Sanchez
Alfonso Gago-Calderón
*Dpto. Expresión Gráfica, Diseño y
Proyectos. Universidad de Málaga*

ALUMBRADO PÚBLICO URBANO FOTOVOLTAICO: ANÁLISIS DE VIABILIDAD TÉCNICA, ECONÓMICA Y SOCIAL

Resumen

Este trabajo analiza la viabilidad de proyectos consistentes en instalaciones de alumbrado público (AP) alimentadas con energía solar fotovoltaica en base a diferentes criterios. En primer lugar se plantea un análisis de la capacidad tecnológica existente en este mercado para alumbrado exterior. En segundo lugar se comparan los requisitos, trabajos necesarios, problemática y costes identificables entre las opciones de planificar y ejecutar el soterramiento del tendido eléctrico y la instalación de nuevas luminarias fotovoltaicas (PV) LED autónomas para cubrir los requisitos normativos exigidos de alumbrado público de calles y vías. Este punto se plantea en base al marco de un caso práctico localizado en un municipio de la Isla de Lanzarote, Las Palmas, con una población en torno a 5.000 habitantes.

El trabajo se completa presentando un estudio estadístico que valora la aceptación social de ciudadanos españoles asociada a este tipo de tecnología en entornos urbanos, desde los aspectos de la mejora de la sostenibilidad urbana, la seguridad de funcionamiento, el impacto visual y la percepción del riesgo de vandalismo.

Palabras clave: *alumbrado público; iluminación fotovoltaica; proyectos sostenibles; Green cities*

Área temática: *Actuaciones sostenibles del espacio urbano. Equipamiento urbano y medidas de eficiencia.*

Abstract

This research analyses, based on different criteria, the viability of projects consisting of public street lighting installations powered by photovoltaic solar energy. First, an analysis of the existing technological capacity in this market for photovoltaics (PV) street lighting is generated. Later, the requirements, work, problems and costs identified are studied for two possible options to renew an aerial grid public lighting installation: channelling the electrical wiring or installing new autonomous LED PV luminaires to cover the regulatory requirements. This comparison is contextualized in the context of a study case located in a municipality with a population of approximately 5,000 habitants in the Island of Lanzarote (Las Palmas, Spain)

The paper is completed presenting a statistical study that assesses the social acceptance of Spanish citizens of this type of technology in urban environments, from the aspects of improving urban sustainability, operational safety, visual impact and perception of risk of vandalism.

Keywords: *public lighting; photovoltaic lighting; sustainable projects; Green cities*

Thematic area: *Sustainable actions of the urban space. Urban equipment and efficiency measures.*

1. Introducción

A partir del desarrollo de bombillas incandescentes a finales del siglo XIX, se han investigado diversos métodos y tecnologías, tanto para producir luz blanca de manera eficiente como para generar y distribuir la energía para su funcionamiento. La tecnología basada en diodos emisores de luz (LED) supone el último gran hito en este sector tecnológico en virtud de su mayor ahorro energético, fiabilidad y fácil control electrónico con respecto al resto de tecnologías implantadas en el AP. La naturaleza digital de estos nuevos emisores tiene además como característica relevante su modo de alimentación, directamente en corriente continua (DC de inglés direct current) y muy baja tensión. (Gago A, 2011)

En la actualidad 1.300 millones de personas, el 20% de la población mundial, no tienen acceso a una red de distribución de electricidad en su vivienda. Esto supone un problema global que se puede equiparar a la limitación de acceso a la alimentación, al agua potable o la sanidad (Carrasco-Moreno LM, 2015). En la década de 1960 se desarrollaron las primeras luminarias solares fotovoltaicas para solventar los requerimientos de iluminación en lugares sin conexión a la red eléctrica. Estos equipos se han ido desarrollando comercialmente hasta nuestros días utilizando principalmente como fuente de luz lámparas compactas fluorescentes (CFL) (Ramchandra, 2011).

En la actualidad, la generalización de las luminarias LED ha supuesto una nueva revolución tecnológica dentro de este segmento de productos. El aumento de los costes de la electricidad y de los combustibles fósiles (Nowak S, 2015), junto con el descenso exponencial en el precio del Watio-pico (Wp) generado con paneles fotovoltaicos (ARE, 2015) y el aumento consistente de la eficiencia de los emisores LED, ha propiciado que las instalaciones de iluminación LED PV se posicionen como una opción tecnológicamente eficiente y económicamente viable para cubrir las necesidades del alumbrado público de las ciudades; no solo para proyectos en los que son la única opción viable sino también para la renovación del alumbrado público urbano, donde las luminarias con alimentación en corriente alterna no tenían competencia hasta el momento (Hyder, 2018). Este punto tiene especial relevancia en zonas con instalaciones eléctricas muy envejecidas o deterioradas, de manera que se evita sustituirlas o adaptarlas a la normativa vigente ahorrando partidas de costes muy significativas como la de su canalización subterránea (Battaglini, 2012).

2. Estado del arte

2.1.- Iluminación

En la actualidad, el 20% de la generación eléctrica del planeta se dedica a la iluminación, un 17% a iluminación interior y un 3% a iluminación exterior. En cualquiera de los dos casos cualquier pequeña mejora supone un importante avance en sostenibilidad y en ahorro económico (Montoya, 2017). En Europa, se estima que las ciudades y pueblos destinan, en

promedio, el 40% de su presupuesto municipal en cubrir el gasto energético asociado a la iluminación de sus calles y edificios públicos (Lau SP, 2014).

En España, el consumo en iluminación exterior en instalaciones de titularidad pública o privada cuyo flujo luminoso se proyecta sobre un espacio abierto de uso público, en 2012 fue de 5,2 TWh (IDAE, 2017). Es más, el consumo de energía en alumbrado público crece en torno a un 2,6% anual, lo que constituye un incremento en el gasto de las arcas de las Administraciones Públicas en un 4,7%. En algunos municipios, el consumo de energía en alumbrado público alcanza hasta el 80% del consumo total de electricidad (Gutierrez-Escolar A, 2015).

2.2.- Tecnología de iluminación led

La tecnología LED ha destacado sobre el resto de dispositivos de iluminación, principalmente por su naturaleza electrónica. Esta naturaleza le ha permitido alcanzar altos valores de eficiencia energética y de vida útil, superando los 300 lm/W en pruebas de laboratorio y las 100.000 horas de vida, respectivamente (Montoya FG, 2017). A continuación en la tabla 1, aparece un pequeño resumen comparativo de las eficiencias y vidas útiles de las diversas tecnologías de iluminación existentes.

Tabla 1. Resumen de tiempos de vida y eficiencias promedias de las tecnologías de iluminación. (Fuente: Elaboración propia)

Sistema de alumbrado	Vida útil	Rendimiento
Incandescencia		
Convencional	1.000 h	12 - 18 lm/W
Halógena	2.000 h	18 - 22 lm/W
Lámpara de descarga		
Vapor de mercurio a baja presión (VMBP)	5.000 - 15.000 h	38 - 91 lm/W
Vapor de mercurio a alta presión (VMAP)	8.000 h	40 - 60 lm/W
VMAP - Luz mezcla	6.000 h	20 - 60 lm/W
VMAP - Halogenuros metálicos (HM)	9.000 h	60 - 95 lm/W
Vapor de sodio a baja presión (VSBP)	6.000 - 8.000 h	160 - 180 lm/W
Vapor de sodio a alta presión (VSAP)	8.000 - 12.000 h	130 lm/W
Lámpara fluorescente compacta	8.000 h	60 lm/W
Plasma		
Plasma	30.000 h	85 lm/W
Iluminación en estado sólido		
LEDs	> 100.000 h	> 300 lm/W

2.3.- Generadores de energía fotovoltaica

La célula solar es el elemento fundamental de cualquier módulo fotovoltaico, en ella se producen todos los fenómenos de conversión de energía solar a energía eléctrica. Las células están creadas con materiales semiconductores dopados con otros materiales. Por su parte, el efecto fotovoltaico es el resultado de convertir un fotón en energía eléctrica.

La energía solar fotovoltaica es una energía renovable, inagotable, no contaminante y que contribuye al desarrollo sostenible. Debido al aumento de producción de paneles fotovoltaicos en China, el coste de los mismos ha disminuido. Esto favorece a la tecnología y al uso de esta energía, puesto que se sitúa a unos precios competitivos con respecto a otras energías renovables. El crecimiento de potencia instalada de energía fotovoltaica mundial se sitúa entre el 20- 25% cada año (Breyer, 2017).

2.4.- Tecnologías de almacenamiento de energía: baterías

Las baterías están formadas por electrolitos que se encargan de almacenar la energía a partir de procesos químicos. Estos electrolitos pueden estar formados por distintos elementos. Los más comunes son el Pb-ácido, el Ni-Cd y, actualmente el más eficiente, el ion-litio. El uso y desarrollo de baterías representa uno de los elementos básicos para un cambio de modelo energético. Son elementos imprescindibles para el desarrollo de sectores estratégicos como los vehículos eléctricos o para asentar definitivamente a las placas fotovoltaicas y al resto de fuentes renovables como segmento principal del mix energético (Gils, 2017).

De esta manera, la Agencia Internacional de la Energía (AIE o IEA, del inglés International Energy Agency) señala que desde el año 2008 el coste de las baterías se ha dividido por cuatro, mientras que la densidad para almacenar energía de las mismas se ha multiplicado por cinco (IEA, 2017).

3.- Requerimientos normativos para iluminación urbana

La “Guía Técnica de Aplicación: Eficiencia Energética en Instalaciones de Alumbrado Exterior” generada por el Gobierno de España (Ministerio de Industria, Energía y Turismo, 2013) desarrolla los criterios de la International Commission on Illumination (CIE) o la Illuminating Engineering Society (IES) para establecer una base normativa de referencia, en donde se establecen las clasificaciones de tipos de vía en función de sus requisitos lumínicos.

El nivel de iluminación requerido por cada tipo de vía depende de múltiples factores como son la complejidad de su trazado, la intensidad, velocidad máxima y los sistemas de control del tráfico o la separación entre carriles destinados a distintos tipos de usuarios. En función de estos criterios, estas vías de circulación se clasifican en varios grupos o situaciones de proyecto, asignándose a cada uno de ellos, unos requisitos fotométricos específicos, que tienen en cuenta las necesidades visuales de los usuarios así como aspectos medioambientales. Uno de los criterios más importantes a la hora de clasificar las vías, es la velocidad de circulación para cada tipo de vía, que queda establecida en la tabla 2.

Clasificación	Tipo de vía	Velocidad del tráfico rodado (km/h)
A	de alta velocidad	$v > 60$
B	de moderada velocidad	$30 < v \leq 60$
C	carriles bici	--
D	de baja velocidad	$5 < v \leq 30$
E	vías peatonales	$v \leq 5$

Tabla 2. Clasificación de las vías según la velocidad de circulación. Fuente: Ministerio de Industria, Energía y Turismo del Gobierno de España (2013).

4.- Análisis de viabilidad de la solución fotovoltaica urbana

4.1.- Análisis de viabilidad técnica. Caso de estudio

4.1.1.- Antecedentes

El análisis de viabilidad técnica se realiza en base a un caso práctico en el Municipio de Haría, Las Palmas, concretamente en el pueblo de Tabayesco. En esta localidad ha salido recientemente a licitación pública, el proyecto denominado “Renovación del alumbrado público del pueblo de Tabayesco”, en un proyecto gestionado por su Cabildo Insular. El proyecto abarca la canalización subterránea del suministro de electricidad así como la instalación de nuevas luminarias eficientes de tipo LED.

En un análisis de viabilidad técnica, se lleva a cabo el dimensionado de una instalación de iluminación LED alimentada con energía solar fotovoltaica que dé servicio a esta localidad objeto de estudio, cumpliendo con los requisitos lumínicos fijados en el concurso público empleado como referencia.

4.1.2. Descripción del problema

Las administraciones públicas locales, en virtud de las carencias detectadas en una auditoría energética realizada, se han visto obligadas a elaborar un plan de renovación del alumbrado público municipal, donde se propone la adecuación a la normativa el suministro eléctrico que da servicio al alumbrado público.

Entre estas medidas, se contempla la canalización subterránea del tendido eléctrico, pues como se comprueba en la figura 1, es muy habitual la conducción eléctrica por fachadas.

Figura 1: Identificación del problema en estudio (Fuente: Google Maps Visto en: Febrero 2018)

4.1.3. Emplazamiento

La instalación prevista estará formada, en una primera fase, por una actuación sobre las calles principales del núcleo urbano con un total de 76 puntos de luz y una segunda fase que comprende la ejecución de las obras e instalaciones en las vías que carecen actualmente de asfaltado, que suma un total de 23 puntos de luz.

Figura 2: Emplazamiento. Pueblo de Tabayesco, Haría, Las Palmas. (Fuente: Google Maps. Visto en: Febrero 2018)

4.1.4. Dimensionado de las luminarias

La zona objeto de actuación, queda clasificada como Zona E1, definida como áreas con entornos o paisajes oscuros, destinadas a observatorios astronómicos de categoría internacional, parques nacionales, espacios de interés natural, áreas de protección especial (red natura, zonas de protección de aves,...) donde las carreteras están sin iluminar. Esto implica unas condiciones operativas específicas, como una temperatura de color de las luminarias en valores cálidos (3.000K) o un flujo hacia el hemisferio superior (FHS_{INST}) inferior o igual al 1% del total emitido. En base a sus condiciones específicas se ha clasificado la vía como ME4b.

Con los requisitos mencionados y conociendo los parámetros geométricos de la calzada, se dimensiona la potencia de las luminarias con el software gratuito DIALux. En el proyecto de

referencia se establecen dos tipos de calles, los resultados se muestran resumidos en la tabla 3.

4.1.5. Dimensionado del panel fotovoltaico, sistema de acumulación y sistema de regulación

En la tabla 4 aparecen resumidas las ecuaciones que permiten el dimensionado de los componentes restantes de la instalación, como son el panel fotovoltaico, el sistema de almacenamiento y el sistema de regulación.

4.1.6. Componentes de la instalación propuesta

En la tabla 5 se pueden visualizar los componentes que conforman la instalación solar LED dimensionada para la localidad objeto de estudio.

4.1.7. Simulación de la instalación propuesta

En este apartado se resumen los resultados de la simulación luminotécnica, el modelado 3D y el renderizado final. Este modelo, pese a tener un enfoque aparentemente estético, se realiza para enriquecer el estudio de viabilidad social, pues permite a los encuestados tener una proyección tridimensional de la instalación propuesta.

4.2.- Análisis de viabilidad económica

En primer lugar, se comparan los resultados obtenidos en un análisis de licitaciones públicas en España enfocadas a la renovación del alumbrado público entre 2016 y 2018, y especialmente aquellas que proponen luminarias alimentadas con energía solar. Dicho estudio puede visualizarse en la tabla 6. Se concluye que, el precio medio por luminaria solar LED para licitaciones públicas en el territorio español es de 1.875,24€, con mástil, cimentación, instalación, gastos generales, beneficio industrial e impuestos incluidos

En segundo lugar, se toma como referencia la licitación pública mencionada en el análisis de la viabilidad técnica, donde se describe la renovación del alumbrado de del pueblo de Tabayesco, Las Palmas. Esta instalación implica la canalización subterránea del suministro eléctrico así como la instalación de nuevas luminarias LED. El valor estimado del contrato se fija en 326.960,38 €, por un total de 99 luminarias LED. Por tanto, se puede concluir que el precio medio de cada luminaria LED para esta licitación es de 3.302,63 €/ud.

Por último, tras un estudio de viabilidad técnica en el que se dimensiona una instalación de iluminación alimentada con energía solar fotovoltaica, que cumpla con los mismos requisitos que la instalación de referencia, se determina un presupuesto de 183.861,70 € por un total de 99 luminarias solares LED. Por tanto, se puede concluir que el precio medio de cada luminaria solar para una licitación de estas características es de 1.857,19 €/ud.

Tipo de Vía	1	2
Clasificación de la vía	ME4b	ME4b
Número de carriles	1	1
Ancho de calzada (m)	7	6
Interdistancia (m)	18	21,5
Altura del punto de luz (m)	6	6
Disposición	Unilateral	Unilateral
Potencia Luminarias (Referencia)	58,1	58,1
Potencia Luminarias (Solar LED)	40	40

Luminaria (Proyecto de referencia)

Luminarias (Propuesta iluminación Solar LED)



Tabla 3. Datos geométricos de las vías de estudio. Fuente: elaboración propia.

Potencia mínima requerida por el generador fotovoltaico	
$P_{G-min} = \frac{W_d \cdot G_{CEM}}{G_{(\alpha,\beta)} \cdot K_T}$	<ul style="list-style-type: none"> - W_d: Consumo energético [Wh/día] - G_{CEM}: Radiación estándar, 1000 W/m² - $G_{(\alpha,\beta)}$: Radiación incidente [Wh/m²-day] - K_T: Eficiencia del regulador y batería [%]
Sistema de acumulación	
$C_N = \frac{Q_d \cdot A}{PD_{MAX} \cdot \eta_{Con}}$	<ul style="list-style-type: none"> - Q_d: Capacidad nominal diaria [Ah/día] - A: Días de autonomía - PD_{MAX}: Profundidad de descarga máxima - η_{con}: Eficiencia del regulador y batería - U_n: Tensión nominal del generador fotovoltaico [V]
Sistema de regulación	
$U_{OC(Tmin)} = U_{OC} + \beta \cdot (T_{min} - 25)$ $I_R = 1,25 \cdot I_{G,sc}$	<ul style="list-style-type: none"> - $U_{OC(TMIN)}$: Tensión nominal del generador fotovoltaico [V] - T_{min}: Temperatura mínima histórica (°C) - U_{OC}: Tensión de circuito abierto [V] - $I_{G,sc}$: Intensidad de cortocircuito del generador [A]

Tabla 4: Ecuaciones para el dimensionado de instalaciones de iluminación LED alimentadas con energía solar fotovoltaica (Fuente: Elaboración propia).

Componente	Parámetro	Valor
Luminaria	Potencia	40W
	Flujo luminoso	4535 lm
	Temperatura de color	3.000K
	Grado de hermeticidad	IP66
	Resistencia impactos	IK09
Sistema de acumulación	Tensión nominal	12 V
	Capacidad	2 x 120 (Ah)
	Peso	32,2 Kg
	Dimensiones (Largo x Ancho x Alto)	407 x 173 x 233 mm
Sistema de regulación	Grado de hermeticidad	IP68
	Tensión nominal	12/24 V
	Dimensiones (Largo x Ancho x Alto)	82 x 100 x 20 mm
	Intensidad de trabajo	10A
	Peso	0,14 kg
Panel fotovoltaico	Potencia nominal	150W
	Eficiencia módulo	15,42%
	Tensión nominal	12V
	Dimensiones (LargoxAnchoxAlto)	1.476 x 659 x 35 mm
	Peso	11,9 Kg
Columna	Altura	5m
	Material	Acero galvanizado

**Imagen
instalación**



Tabla 5: Componentes de la instalación propuesta (Fuente: Elaboración propia).

Lugar y fecha de publicación	Sistema propuesto	Nº de luminarias	Potencia Luminarias (W)	Presupuesto adjudicación / Precio medio licitación	Presupuesto adjudicación / Precio medio adjudicación
Lloseta, Islas Baleares (Septiembre 2016)	Luminaria vial LED Batería, regulador y panel PV integrados en cuerpo luminaria	39	40	49.957,33€ / 1.280,96€	-
Calpe, Comunidad Valenciana (Agosto 2017)	Luminaria vial LED Batería y regulador integrados en el cuerpo de la luminaria Panel PV independiente	102	30	130.000€ / 1.274,51€	-
Pamplona, Navarra (Noviembre 2016)	Luminaria vial LED Batería, regulador y panel PV no integrados en cuerpo luminaria	31	30	95.397,58€ / 3.077,34€	-
Málaga, Andalucía (Diciembre 2017)	Luminaria vial LED Batería, regulador y panel PV no integrados en cuerpo luminaria	72	30	177.881,83€ / 2.470,58€	-
La Antigua, Las Palmas (Noviembre 2016)	Luminaria villa LED Batería, regulador y panel PV no integrados en cuerpo luminaria	75	42	118.645,61€ / 1.581,94€	11.1815€ / 1.490,87€
Málaga, Andalucía (Septiembre 2016)	Luminaria vial LED Batería, regulador y panel PV no integrados en cuerpo luminaria	38	30	91.857,15€ / 2.417,29€	86.345,72€ / 2.272,26€
Eivissa, Islas Baleares (Abril 2017)	Luminaria vial LED Batería, regulador y panel PV no integrados en cuerpo luminaria	67	30	170.903,21€ / 2.550,79€	159.921,43€ / 2.386,89€

Tabla 6: Licitaciones públicas en España entre 2016 y 2017 (Fuente: Elaboración propia).

	Resultados energéticos			Resultados económicos		
	Potencia luminaria	Energía consumida	Potencia instalada	Presupuesto total instalación	Precio total por luminaria	Disminución presupuesto total
Instalación de referencia	58,1 W	6995,78 kWh-año	5,75 kW	326.960,38 €	3.302,63 €	0,00%
Instalación solar LED (1). Estudio concursos públicos	32,5 W	0 kWh-año	0 kW	185.648,76 €	1.875,24 €	43,22%
Instalación solar LED (2). Estudio viabilidad técnica	40 W	0 kWh-año	0 kW	183.861,70 €	1.857,19 €	43,77%
Anotaciones	Se reduce la potencia por luminaria un 31,15% en la instalación solar LED (2) con respecto a la instalación de referencia	Las instalaciones solares son autónomas por tanto el consumo de energía de la red es nulo y por tanto la potencia instalada es 0 kW.	Presupuesto total de la instalación. En la instalación de referencia: 67 puntos de luz con canalización en calzada asfaltada y 33 en camino de tierra. Todas las instalaciones incluyen gastos generales, beneficio industrial e impuestos			

Tabla 7: Resultados del estudio de viabilidad económica

4.3. Análisis de viabilidad social. Estudio de la percepción ciudadana

Neeraj Kumar Singh et al (Singh NK, 2017) realizaron una encuesta compuesta por 14 preguntas acerca de la opinión pública en referencia al uso de energía solar fotovoltaica en diferentes regiones de la India. Los resultados incluyen opiniones muy diversas, destacando que la mayoría de los encuestados no tiene una idea clara de lo que es la energía solar fotovoltaica y sus aplicaciones.

Con el objetivo de obtener la opinión pública, en nuestro caso, de la sociedad española sobre esta tecnológica y la viabilidad de implantarla en nuestras ciudades, se ha realizado estudio estadístico basado en una encuesta en el que se realizan preguntas sobre este tema a 349 sujetos anónimos. La encuesta se ha realizado mediante Google Forms y puede consultarse o realizarse a través del siguiente enlace público: <https://goo.gl/forms/Bva0fUczehwi2u0z2>

Es de reseñar que casi el 60% de los encuestados corresponde a un sector de la población con una edad inferior a los 25 años. Una posible explicación se atribuye al hecho de realizarse online, donde existe una mayor difusión entre el público joven.

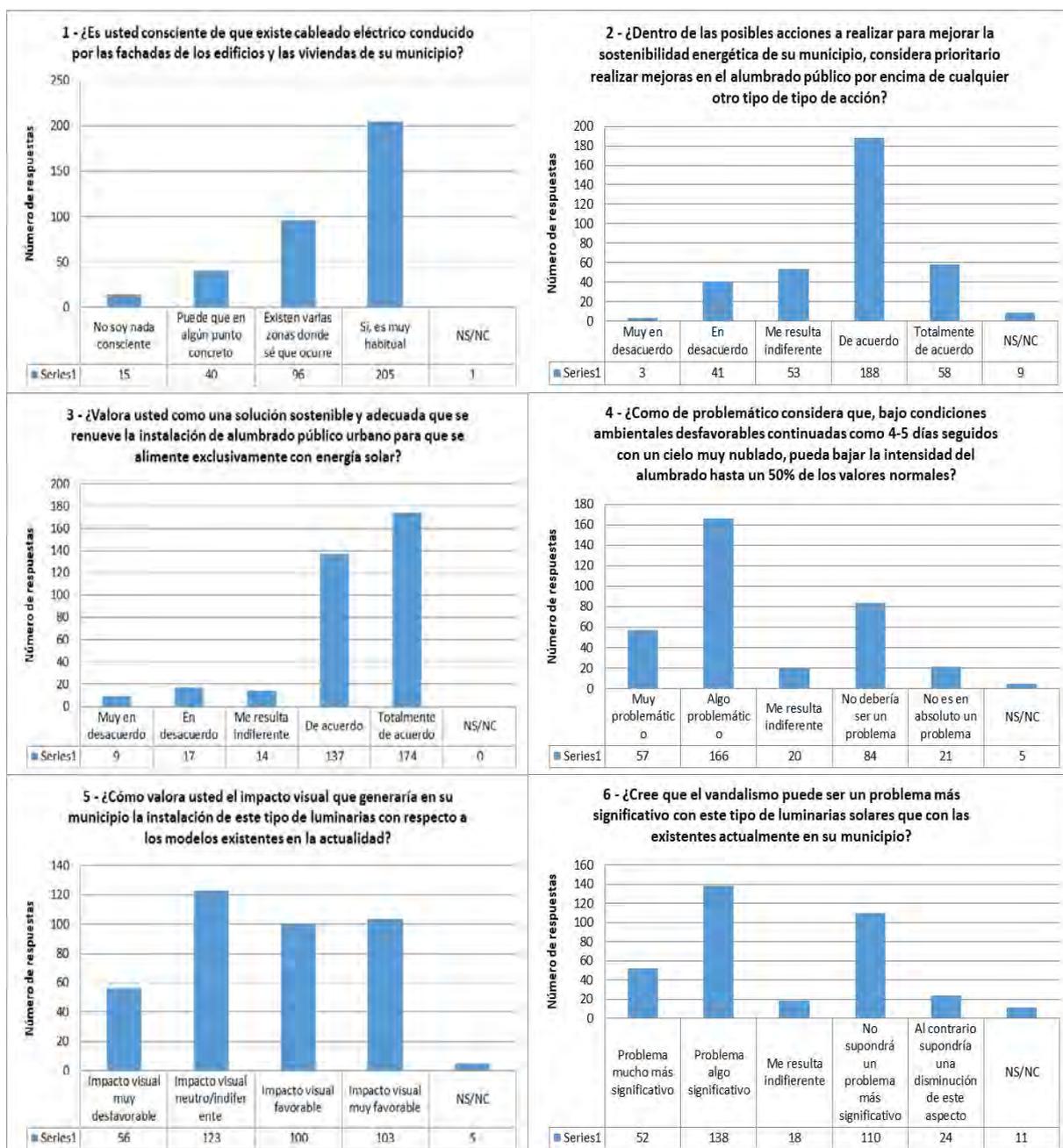


Figura 3: Resumen de resultados de la encuesta de valoración de la aceptación social del alumbrado solar fotovoltaico en entornos urbanos (Fuente: Elaboración propia).

Los principales resultados del estudio se presentan en la figura 3. De estos se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- La gran mayoría de la población es consciente de que existe cableado eléctrico conducido por las fachadas de los edificios. Tan solo el 4% de los encuestados afirma no ser consciente.
- Casi el 60% de los encuestados están de acuerdo o totalmente de acuerdo en considerar prioritario realizar mejoras en el alumbrado público por encima de

cualquier otro tipo de acción para mejorar la sostenibilidad energética de su municipio.

- El 89% considera una solución sostenible y adecuada que se renueve la instalación de iluminación urbana para que se alimente exclusivamente con energía solar fotovoltaica.
- La percepción ante el problema de que, bajo condiciones ambientales desfavorables continuadas como 4-5 días seguidos con un cielo muy nublado, pueda bajar la intensidad del alumbrado hasta un 50% de los valores normales para garantizar el servicio. El 47% de los encuestados lo considera algo problemático y el 16% muy problemático.
- En referencia a la percepción visual de la tecnología propuesta frente a la convencional, un 32% lo considera neutro/indiferente, por otra parte, más del 50% encuentra favorable el cambio, siendo muy favorable o favorable con un 27% y 26% respectivamente.
- Sobre el posible incremento del vandalismo sobre este equipamiento urbano, más de la mitad de los encuestados considera que el problema del vandalismo puede agravarse, siendo considerado un problema mucho más significativo o algo significativo con un 15% y 39% respectivamente.

5. Ejemplos

5.1. Cuimba, Angola

En el contexto de esta investigación, se ha participado en un proyecto de alumbrado público compuesto por 1.365 luminarias autónomas LED de 50W en la ciudad de Cuimba (Angola), como se ilustra en la figura 4. El presupuesto de instalar este tipo de equipos de iluminación se redujo en más del 35% en comparación con la opción analizada para renovar y canalizar la red eléctrica existente para un sistema de alumbrado alimentado en red.



Figura 4: Cimentación, instalación y puesta en marcha de la instalación.

5.2. BRISBANE, AUSTRALIA

En un proyecto subvencionado por la Universidad de Queensland (Brisbane), se ha determinado como viable para este tipo de localizaciones, la opción de reemplazar el sistema de alumbrado de la ciudad con luminarias solares LED (Jiang X., 2016).

5.3. Jordania

En un estudio de viabilidad económica desarrollado por Lina Al-Kurdi et al (2015), que investiga la posibilidad de emplear sistemas de iluminación solar LED en el alumbrado público de Jordania, se determinó que se obtenían ahorros del 50% con respecto a la instalación actual existente. En cuanto a los periodos de amortización, se obtuvieron los siguientes resultados:

- Periodo de amortización de 7,20 años para instalaciones de iluminación LED conectadas a la red de corriente alterna.
- Periodo de amortización de 3,15 años para instalaciones de iluminación LED alimentadas con energía solar fotovoltaica.

5.4. Indonesia

Ika Shinta Mardikaningsih et al (Mardikaningsih IS, 2016), realizan un estudio de viabilidad técnico-económica empleando métodos como el VAN o la relación coste-beneficio con una proyección a 25 años. Determinan que la inversión empleando luminarias solares para alumbrado urbano como factible, siendo un 97% más rentable que el actual empleo alimentación en red con un componente principal de energía basado en combustibles fósiles.

5.5. ISLAS CANARIAS, ESPAÑA

De un estudio propio de la viabilidad técnica-económica de instalaciones de iluminación solar LED en el término municipal de Haría, Las Palmas, se concluye que el empleo de esta tecnología supone un ahorro en un presupuesto de ejecución material de un 43,77% con respecto a la canalización subterránea e instalación de nuevas luminarias LED conectadas a la red de corriente alterna, necesaria para la adecuación a la normativa de las instalaciones eléctricas existentes aéreas y en superficie por las fachadas de las viviendas. Esta valoración del ahorro se ha realizado usando la 26ª Edición de la Base de Precios de Construcción en Canarias y la 5ª edición de la Base de Precios de Obras Viales en Canarias.

Figura 5: Instalación de iluminación solar LED propuesta en el estudio de viabilidad técnico-económico, Haría, Las Palmas.

6. Conclusiones y línea de trabajo futura

Se concluye en que las instalaciones de alumbrado público urbano fotovoltaico resultan técnica, económica y socialmente viables en virtud de los resultados obtenidos.

El análisis de viabilidad técnica, realizado en el marco de un caso práctico, permite visualizar la instalación y comprobar que la tecnología propuesta cumple de manera contundente con los requisitos normativos. Este estudio se ve contrastado con el análisis de los concursos públicos en España, donde se comprueba como las luminarias solares LED comienzan a adquirir protagonismo en los últimos años.

Por su parte, el estudio de viabilidad económica proporciona los resultados más significativos, determinando que resulta un 44% más viable la opción de realizar una instalación de iluminación LED PV con respecto a una instalación de iluminación LED conectada a la red de corriente alterna y adaptada a la normativa vigente mediante la canalización subterránea.

Por último, del estudio de viabilidad social se concluye que la mayoría de la población es consciente del problema de la conducción aérea y sobre fachadas y, a su vez, el 89% considera una solución sostenible y adecuada que se renueve la instalación de iluminación urbana para que se alimente exclusivamente con energía solar fotovoltaica. Por su parte, la mayoría de los encuestados valora como problemático el hecho de que bajo condiciones ambientales desfavorables continuadas, pueda bajar la intensidad del alumbrado para garantizar el servicio y más de la mitad considera que el problema del vandalismo puede agravarse.

Las exigencias medioambientales, la creciente apuesta internacional en el empleo de fuentes de energías renovables y la probada viabilidad de la tecnología de iluminación LED PV da lugar a que se hagan pronósticos alentadores a favor de ésta tecnología, esperando su implantación progresiva en zonas con un buen recurso solar.

Referencias

- Alliance for Rural Electrification (ARE). Rural electrification with renewable energy: Technologies, quality standards and business models, www.ruralelec.org
- Battaglini A, Komendantova N, Brtnik P y Patt A. Perception of barriers for expansion of electricity grids in the European Union. *Energy Policy*. 2012;47; pp. 254-259.
- Breyer, C, Bogdanov, D, Gulagi, A, Aghahosseini, A, Barbosa, LS, Koskinen, O y Farfan, J. (2017). On the role of solar photovoltaics in global energy transition scenarios. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 25(8), 727-745.
- Carrasco-Moreno LM. Characterisation of the operation & maintenance phase in pv rural electrification programmes. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid. 2015.
- Gago A, Fraile J. Iluminación con tecnología LED. Ediciones Paraninfo S. A., 2012.
- Gils, HC, Scholz, Y, Pregger, T, de Tena, DL y Heide, D. (2017). Integrated modelling of variable renewable energy-based power supply in Europe. *Energy*, 123, 173-188.
- Gutierrez-Escolar A, Castillo-Martinez A, Gomez-Pulido JM, Gutierrez-Martinez JM, Stapic Z, Medina-Merodio JA. A study to improve the quality of street lighting in Spain. *Energies*, 8(2), 976-994. 2015
- Hyder F, Sudhakar K, y Mamat R. Solar PV tree design: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018; 82, pp. 1079-1096.

Jiang X. Innovation to Brisbane City Council Street Lighting System with Solar Powered LED. University of Queensland. Australasian Universities Power Engineering Conference-AUPEC2016

Lau SP, Weddell AS, Merrett GV, White NM. Energy-neutral solar-powered street lighting with predictive and adaptive behaviour. In Proceedings of the 2nd International Workshop on Energy Neutral Sensing Systems (pp. 13-18). ACM. 2014

Mardikaningsih IK, Sutopo W, Hisjam M, Zakaria R. Techno-economic Feasibility Analysis of a Public Street Light with Solar Cell Power. Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2016 Vol II, IMECS 2016, March 16 - 18, 2016, Hong Kong.

Montoya, FG, Peña-García, A, Juaidi, A y Manzano-Agugliaro, F. (2017). Indoor lighting techniques: An overview of evolution and new trends for energy saving. Energy and Buildings, 140, 50-60.

Nowak S. Trends in photovoltaic applications, Report IEA-PVPS T1-27:2015, IEA International Energy Agency, 2015.

Singh NK, Gupta R, Salimath GF, Badge SS. Public opinion on solar photovoltaic energy utilization-A survey based study. In Proceedings of International Conference on Smart and Sustainable Initiatives for Energy within Environmental Constraints. 2017, Vol. 1, pp. 28-34, Malaysia.

Ramchandra P. y Diouf B. Solar lighting. Springer Science & Business Media, 2011.

Correspondencia (Para más información contacte con):

Nombre y Apellido: Rami D. Orejón Sánchez
Teléfono: + 34 695 85 46 59
E-mail: rami.haria@gmail.com

Cesión de derechos

Por la presente, y como autor del trabajo mencionado arriba, cedo al Palacio de Ferias y Congresos de Málaga una licencia no-exclusiva irrevocable para imprimir, reproducir, distribuir, transmitir o comunicar de cualquier manera dicho trabajo, incluyendo el derecho de hacer modificaciones de formato. Además, afirmo que esta cesión no lesiona los derechos de terceros.



Javier Llorente
Sergio Díaz de Garayo
*CENER, Centro Nacional de Energías
Renovables*
Javier Lerga
Álvaro Miranda
*Mancomunidad de la Comarca de
Pamplona*

APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE LAS REDES DE AGUA EN LA MANCOMUNIDAD DE LA COMARCA DE PAMPLONA PARA SU APLICACIÓN EN CLIMATIZACIÓN

Resumen

En la búsqueda de nuevas formas de aprovechamiento de la energía que permitan reducir la dependencia de los combustibles fósiles, se presenta el trabajo realizado para evaluar de manera teórica, el potencial energético para aplicaciones de climatización en las redes de agua en la Mancomunidad de la Comarca de Pamplona. El planteamiento está alineado con la estrategia europea que considera a la hidrotermia, entre otras, como una fuente renovable siempre que el rendimiento medio estacional de la bomba de calor sea superior a un valor límite determinado. El presente trabajo evalúa para la red de abastecimiento y la de saneamiento, dos métodos teóricos distintos de aprovechamiento del calor residual, a partir de los datos de caudal y temperatura, así como las características de las tuberías y los colectores por los que circulan.

Abstract

Searching for new ways of energy recovery that might allow a reduction on fossil fuels, this work presents a study to evaluate theoretically, the energy potential on waste and drinking water networks for heating purposes in the community of Pamplona. The work is aligned with the European strategy that considers hydrothermal energy, among others including aerothermal energy, such a renewable energy source, considering that the seasonal performance factor of the heat pump is higher than threshold value. The present work evaluates for both, the waste and drinking water networks, two different theoretical methods

to empower the heat recovery from flow and temperature data, and the characteristics of pipelines and collectors in the networks.

Palabras clave: *aguas residuales; agua de red; bomba de calor; aprovechamiento energético; hidrotermia.*

Área temática: *Actuaciones sostenibles del espacio urbano*

1. Introducción

En 2014, la Comisión Europea, CE fijó los objetivos fundamentales del marco de clima y energía para 2030, que se centran en la reducción de un 40% de las emisiones de gases de efecto invernadero (respecto a niveles de 1990); en un aporte de 27% de energías renovables y en la mejora del 27% de la eficiencia energética (CE, 2014). Para ello, la propia Comisión y los Estados Miembros vienen impulsando desde hace años, medidas que permitan alcanzar los objetivos fijados. Entre ellas, una directiva de 2009 (Directiva 2009/28/CE) sobre el fomento del uso de energía de fuentes renovables ya se reconocía a la bomba de calor como parte de la estrategia para incrementar el uso de energías limpias en la Unión Europea para la calefacción y refrigeración, siempre que la producción final de energía supere de forma significativa el insumo de energía primaria necesaria para impulsar la bomba de calor. Para la realización de este cálculo, se publicaron las directrices (Decisión 2013/114/UE) para el cálculo de la energía renovable procedente de las bombas de calor de diferentes tecnologías, entre las que se encuentra la hidrotermia.

Actualmente, más del 68% de los españoles (Fomento, 2017) vive en ciudades de más de 50.000 habitantes, por lo que gran parte del consumo de energía en refrigeración y calefacción de viviendas tiene lugar en entornos urbanos. No obstante, el acceso a las redes de agua para su empleo como foco frío o foco caliente no es tarea sencilla.

En este contexto, la Mancomunidad de la Comarca de Pamplona, MCP, empresa encargada, entre otros, de la gestión de la red de agua de abastecimiento y de saneamiento en Pamplona y alrededores, se plantea la realización de un estudio del potencial de aprovechamiento energético del calor residual en sus redes de agua.

2. Bomba de calor e hidrotermia

La bomba de calor, es una máquina térmica que transfiere energía de un foco frío a otro caliente. Para ello, dispone de un circuito frigorífico tradicional, en el que aprovechando al calor latente de evaporación y de condensación del fluido caloportador y la combinación de presiones altas y bajas, es posible absorber energía en un ambiente frío y transferirla a un ambiente cálido, por medio de la acción de un compresor.

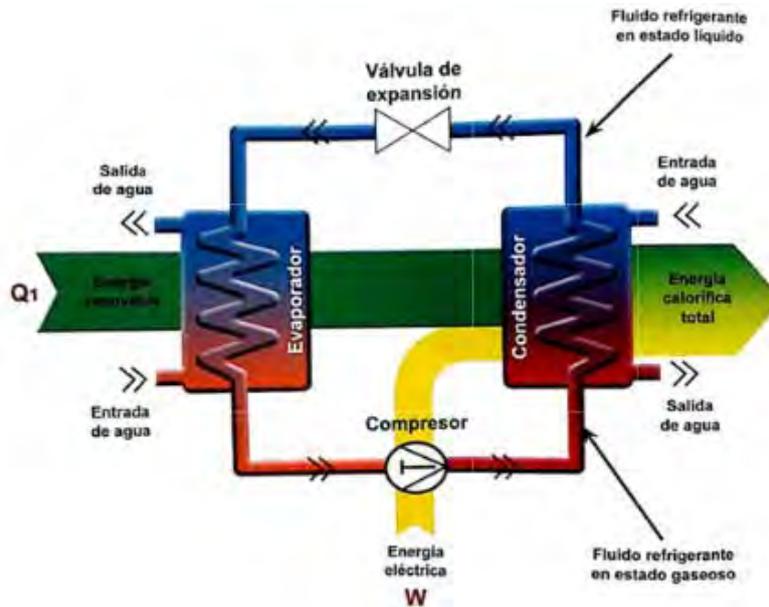


Figura 1: Esquema de funcionamiento de la bomba de calor agua-agua (AFEC,2015)

El gran interés de la bomba de calor radica en que con un aporte reducido de energía eléctrica, es posible obtener una energía calorífica con un ratio 3 ó 4 (incluso superiores) veces superior. De acuerdo con las ecuaciones que definen el funcionamiento de la bomba de calor, eq. (1), (2) y (3); para el caso de calefacción, el ratio mencionado sería el COP. Las ecuaciones relativas a las bombas de calor son:

$$Q_{cond} = W_{elec} + Q_{evap} \quad (1)$$

$$COP = \frac{Q_{cond}}{W_{elec}} \quad (2)$$

$$EER = \frac{Q_{evap}}{W_{elec}} \quad (3)$$

Una clasificación de las bombas de calor puede realizarse según la fuente de origen de la energía. Así, si se extrae calor del aire, se tiene aerotermia, geotermia cuando es del terreno, y finalmente hidrotermia cuando se extrae del agua. Como el proyecto pretende cubrir la demanda de calefacción en edificios y suministrar ACS, la bomba de calor a seleccionar será de tipo agua-agua.

3. Datos de partida

En el año 2016, MCP se encargó del abastecimiento de unos 30.236.789 m³ de agua potable a una población cercana a 400.000 habitantes que incluye a Pamplona y más de 50 municipios de su comarca, arrojando un consumo promedio diario por habitante de 207 litros (MCP,

2017). Y todo ello, controlando una red de tuberías que se extiende por más de 1.697 km. Así, en la red de saneamiento, la longitud total de colectores supera los 1.792 km.

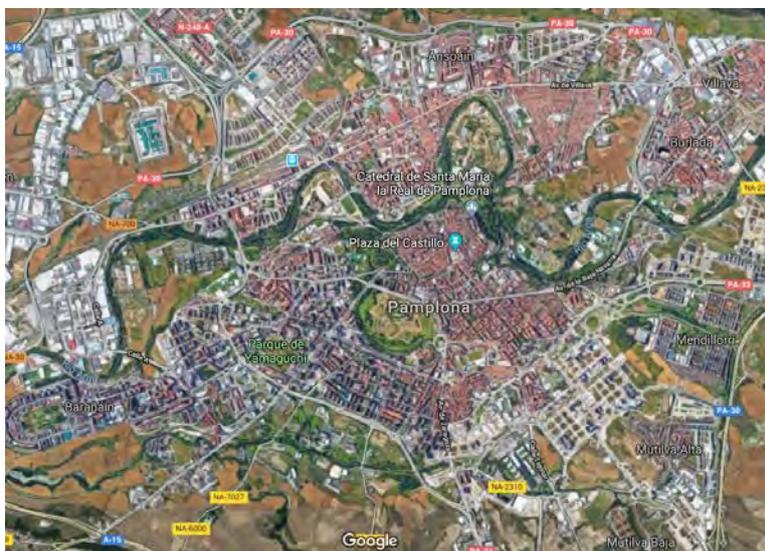


Figura 2: Imagen satélite de la ciudad de Pamplona y parte de su comarca

Desempeña por tanto una tarea crucial para el correcto desempeño de las actividades propias de un entorno urbano, y lo hace de manera muy eficiente, ya que el agua consumida no registrada está muy por debajo del promedio nacional, fruto de un mantenimiento ágil y preciso y de una planificación de la red concisa y detallada. De un tiempo a esta parte, se ha hecho un gran esfuerzo con la incorporación de tecnologías informáticas en la gestión de la red. Por una parte, se cuenta con la integración de toda la red de suministro y abastecimiento en un sistema de información geográfica (GIS). Por otra, se dispone de un sistema de control y adquisición de datos (SCADA) para la correcta gestión en tiempo real de la red.



Figura 3: Red de tuberías de abastecimiento y colectores de saneamiento en Pamplona en GIS

Con la combinación de ambos sistemas, puede conocerse la temperatura horaria de abastecimiento y saneamiento en diversos puntos de la red (principalmente en depósitos

y puntos de origen del agua para abastecimiento; y en la depuradora de agua residual para saneamiento); además, mediante un modelo computacional de la red, puede calcularse el caudal de agua (Figura 4) que discurre por los distintos tramos de la red en unas condiciones dadas, con resultados similares a otros estudios precedentes (Cipolla, 2014),. Por tanto, se dispone de datos de temperatura y caudales en escala horaria, así como de las características (diámetro y longitud, entre otros) de los distintos elementos de la red. No obstante, y según la bibliografía consultada, se han seleccionado sólo aquellas tuberías (abastecimiento) con un caudal promedio anual superior a 20 l/s y aquellos colectores (saneamiento) cuyo caudal promedio anual es superior a 15 l/s, garantizando de esta manera un potencial de aprovechamiento térmico significativo.

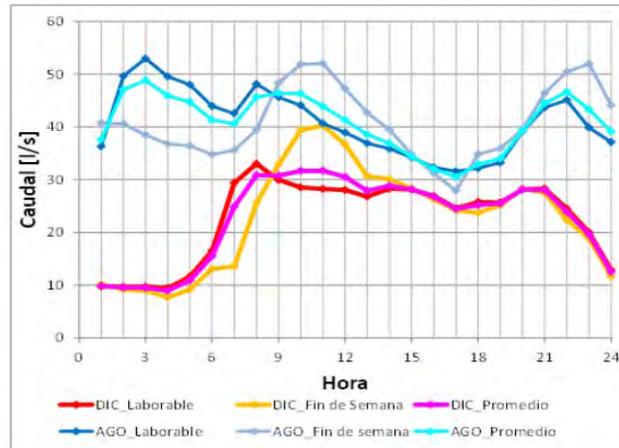


Figura 4: Evolución de caudales horarios de un colector concreto según el tipo de día y mes.

El agua en Pamplona proviene de tres acuíferos distintos, por lo que dependiendo de su origen la temperatura del agua de red varía. Para ello, a cada tubería se le asigna la temperatura en cada hora según la proveniencia del agua. Los datos horarios se han obtenido del SCADA de MCP que dispone de registro de temperatura en diversos puntos de la red. Tomando de manera simplificada los valores de temperatura para dos tuberías distintas, en la figura 5 se

ve claramente que en verano, la temperatura del agua de uno de estos acuíferos presenta una temperatura unos 3°C mayor, siendo en invierno la temperatura similar.

La temperatura de la red de saneamiento, es entre 3-5°C superior, dependiendo mucho del nivel de pluviosidad que se hubiera tenido en el mes correspondiente.

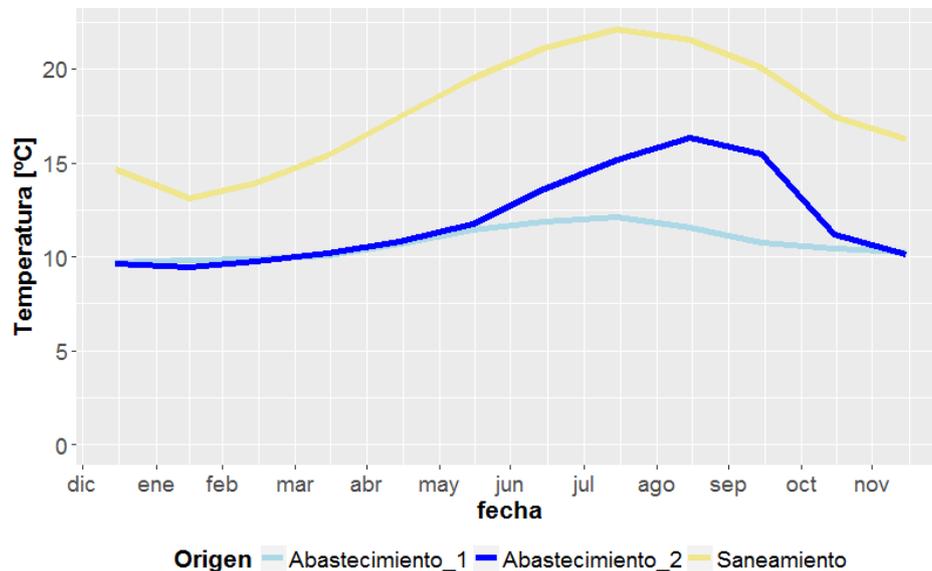


Figura 5: Evolución de la temperatura en las redes de Abastecimiento y Saneamiento

4. Descripción de los intercambiadores propuestos

El objetivo principal es analizar el potencial de aprovechamiento térmico tanto en la red de abastecimiento como la de saneamiento. Ambas redes tienen un funcionamiento y una problemática distinta, por lo que se busca incorporar la solución más adecuada en cada caso. No obstante, en términos generales, el problema planteado es el mismo, como se indica en la figura 6. Se dispone de un edificio o punto de consumo que quiere acondicionarse (para simplificar la explicación, se considera calefacción, pero podría refrigerarse). Para ello, emplea una bomba de calor agua-agua. En el lado del evaporador (en calefacción), se dispone de un intercambiador de calor que permite la cesión de calor a la bomba de calor para permitir el cambio de fase del fluido refrigerante. A este intercambiador de calor, le llega una corriente de agua (u otro fluido) que se calienta por medio de la cesión de calor desde la red de agua (bien sea saneamiento o abastecimiento). En el presente estudio, el cálculo se centra en el estudio de la cesión del calor desde la red de agua hasta la corriente de agua u otro fluido que permite la evaporación del fluido refrigerante (elemento II de la figura 6)

Para ello, se parte de soluciones propuestas por Hepbasli, 2014 que propone distintos esquemas de aprovechamiento de energía y Oguzhan, 2015 que indica fabricantes de

soluciones específicas. Entre ellos, el fabricante con más recorrido y que ofrece más experiencias es KASAG.

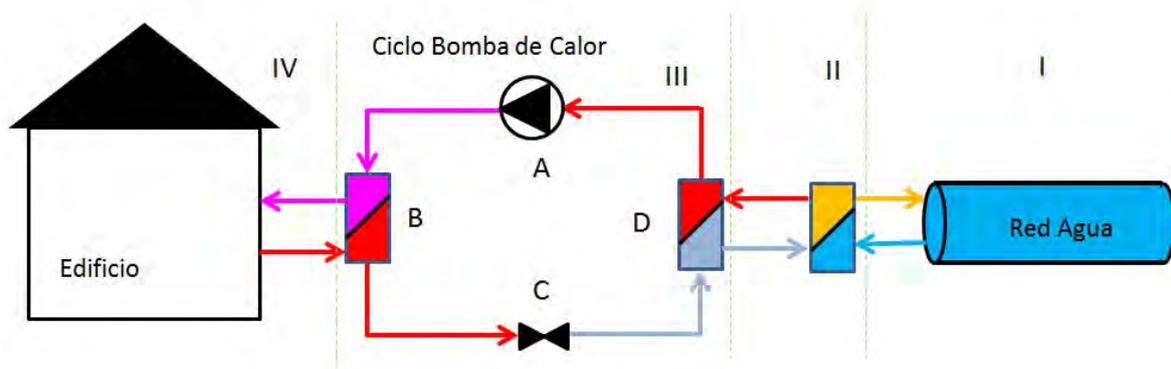


Figura 6: Esquema de instalación propuesta

I: Red de agua pública	II: Intercambiador de calor	III: Bomba de calor	IV: Edificio / Consumidor
A: Compresor	B: Condensador	C: Válvula de expansión	D: Evaporador

4.1. Red de abastecimiento

En este caso, se dispone de agua de red a un promedio de 4 bar de presión aproximadamente, por lo que el agua ocupa toda la sección del tubo. Se trata de agua de consumo humano, por lo que no debe haber infiltración de ningún tipo en la red. La propuesta consiste en una solución integrada del intercambiador de calor con la tubería. Para ello, la solución constructiva del fabricante, incluye un compartimento alrededor de la tubería por el que circula el fluido que extrae calor de la red de agua. Como puede verse en la figura 7, el fluido circula en tres regiones emplazadas alrededor de la tubería, y a lo largo de una longitud de 3 metros va robándole calor al agua de red, incrementando su temperatura. Habitualmente, se colocan módulos del intercambiador de 3 m de longitud de forma sucesiva, sumando la longitud que provea de la potencia requerida por la aplicación térmica. Esta disposición en paralelo de los distintos módulos permite mejorar el gradiente térmico del intercambio y, por lo tanto, su

eficiencia; logrando reducir la longitud total del dispositivo si se compara con un intercambiador longitudinal.

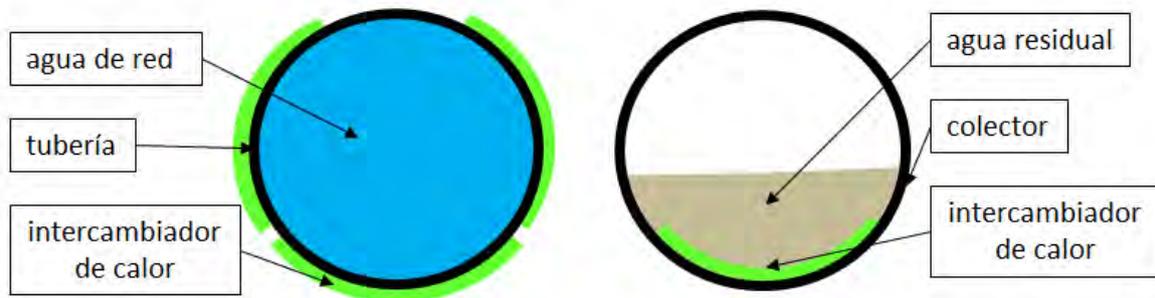


Figura 7: Intercambiadores integrados en tubería y colector (izda. y dcha. respectivamente).

4.2. Red de saneamiento

Para el caso de la red de saneamiento, el mercado no dispone de muchas soluciones comerciales. Así como en el caso de la red de abastecimiento el fluido que circula por la tubería ocupa toda la sección transversal, para el caso de la red de saneamiento el fluido no está presurizado, por lo que el movimiento del fluido es por gravedad. En este caso, la sección ocupada del fluido es normalmente inferior a la mitad, como puede apreciarse en la figura 7. Por tanto, no será preciso que el intercambiador de calor se extienda a lo largo de todo el perímetro del colector.

Debido a la complejidad operativa de reemplazar un colector existente, en este estudio se propone una derivación de la red de saneamiento con un nuevo colector. El intercambiador de calor se sitúa entonces en el tercio inferior del colector. Por tanto, debe calcularse el diámetro de colector tal que el calado del fluido en el colector sea tal que el ángulo cubierto (θ en la figura 8) sea superior a 120° para aprovechar toda la superficie de intercambio.

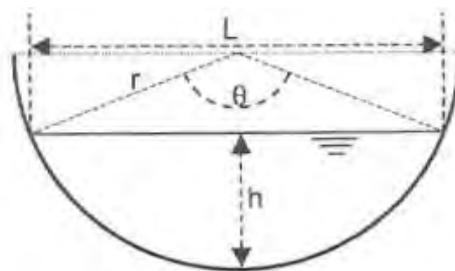


Figura 8: Relaciones geométricas en los colectores

Al igual que en la red de abastecimiento, la longitud de cada tramo de intercambiador es de 3 metros, pudiendo colocarse tantos tramos como sea preciso para conseguir la potencia

necesaria. Los tramos funcionan a modo de intercambiadores en paralelo, y la viscosidad en la red de saneamiento se estima 2,5 veces la de abastecimiento (Zhibin, 2014).

5. Desarrollo del modelo matemático

Básicamente, se trata de la resolución de un problema de transferencia de calor. Se dispone de un fluido a una temperatura, que cede su calor a otro fluido que se encuentra a menor temperatura a través de un intercambiador de calor. Los valores de los coeficientes de transferencia global de calor de los que se dispone son para un diámetro concreto y para unas condiciones de temperaturas y caudales de diseño, que no se corresponden con las condiciones de operación. Para adaptar el cálculo a la situación en la MCP, se realiza el modelo matemático que permita establecer el potencial de aprovechamiento de energía residual. La transferencia de calor viene determinada por:

$$\dot{Q} = U \cdot A \cdot \Delta T_m \quad (4)$$

siendo U el coeficiente de transferencia térmica, A el área de intercambio y ΔT_m la diferencia de temperaturas media logarítmica. Este último término se define como:

$$\Delta T_m = \frac{(T_{c2} - T_{f2}) - (T_{c1} - T_{f1})}{\ln \left[\frac{(T_{c2} - T_{f2})}{(T_{c1} - T_{f1})} \right]} \quad (5)$$

con T_{c1} la temperatura del fluido caliente a la entrada del intercambiador; T_{c2} la temperatura a la salida; T_{f1} temperatura del fluido frío en la entrada y T_{f2} temperatura a la salida.

Por otra parte, el coeficiente de transferencia térmica depende de la resistencia que se ofrece al paso del calor. En la figura 9 se identifican las 4 resistencias térmicas principales: el coeficiente de convección en el lado del agua de red, R_1 ; el factor de ensuciamiento debido a la presencia de una película de material depositado en la pared de la tubería, R_2 ; la resistencia

de la propia tubería, R_3 y finalmente, el coeficiente de convección en el lado del agua que va al circuito de la bomba de calor R_4 .

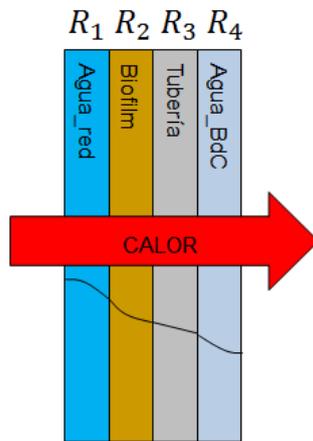


Figura 9: Flujo de calor y resistencias al paso

$$U = \frac{1}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} \quad (6)$$

Para la modelización matemática de cada uno de estos términos se tomaron:

$$R_1 = \frac{1}{\frac{(0,012 \cdot (Re^{0,87} - 280) \cdot Pr^{0,4}) \cdot k_{red}}{d_i}} \quad (7)$$

Esta resistencia considera el coeficiente de convección en el interior de la tubería y se calcula a partir del número de Nusselt, obtenido con la correlación propuesta por Gnielski para flujo turbulento en tubos lisos. En la expresión anterior, Re es el número de Reynolds; Pr , número de Prandtl; k_{red} , la conductividad térmica del agua del interior de la tubería y d_i el diámetro interior de la tubería. Al disponer de las características de todas las tuberías, se dispone de la

información relativa al diámetro para cada una de ellas. Como se dispone además del caudal circulante, se puede calcular la velocidad del agua en la tubería, como:

$$v_{red} = \frac{q_{red}}{\pi \cdot \left(\frac{D_{tubería}}{2}\right)^2} \quad (8)$$

Con q_{red} el caudal circulante y $D_{tubería}$, el diámetro interior de la tubería. Con la velocidad de la tubería, se calcula el número de Reynolds y con él el coeficiente de convección.

Para el caso de los colectores, el cálculo de la velocidad difiere ligeramente, ya que la sección transversal del colector ocupada por el fluido es inferior a la mitad. De acuerdo con la figura 8, el cálculo del calado, h , es sencillo:

$$h = r \cdot \left(1 - \cos\frac{\theta}{2}\right) \quad (9)$$

Aplicando la fórmula de Manning para el cálculo de la velocidad del agua en canales abiertos, se obtiene la velocidad de la red de saneamiento.

$$v_{san} = \frac{1}{n} \cdot R_h^{\frac{2}{3}} \cdot \sqrt{pte} \quad (10)$$

Con n , coeficiente de rugosidad igual a 0,014; R_h el radio hidráulico según la superficie mojada y pte la pendiente del colector.

El cálculo del segundo término considera el fouling o factor de suciedad de la tubería, que tiene en cuenta tanto la deposición de partículas sobre la superficie de la tubería como la corrosión de la misma.

$$R_2 = \frac{1}{U} - \frac{1}{U_o} \quad (11)$$

U es el coeficiente global de transferencia térmica, siendo U_o el mismo coeficiente global, pero sin tener en cuenta el factor de ensuciamiento. De acuerdo con lo propuesto por el fabricante, se toma un valor de $R_2=780 \text{ W/m}^2\text{K}$.

El siguiente término tiene en cuenta la transferencia de calor a través del material de la tubería:

$$R_3 = \frac{\ln\left[\frac{d_e}{d_i}\right]}{2 \cdot \pi \cdot k_{tubería}} \quad (12)$$

Donde d_e es el diámetro exterior y $k_{tubería}$ es la conductividad térmica de la tubería, 15 W/mK .

Finalmente, para el cálculo del último término, que tiene en cuenta el coeficiente de convección exterior, en función de si el flujo es turbulento o laminar, se tienen las siguientes expresiones:

$$R_{4_{laminar}} = \left(3,66 + \frac{0,0668 \cdot \frac{d_{hext}}{L} \cdot Re \cdot Pr}{1 + 0,04 \cdot \left[\left(\frac{d_{hext}}{L}\right) \cdot Re \cdot Pr\right]^{2/3}} \right) \cdot \frac{k_{bdc}}{d_{hext}} \quad (13)$$

Si el flujo es laminar, se toma la expresión de Hausen, donde d_{hext} es el diámetro hidráulico exterior; L , la longitud de la tubería y k_{bdc} , la conductividad térmica del fluido que va al intercambiador de la bomba de calor.

$$R_{4turbulento} = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot \frac{k_{bdc}}{d_{next}} \quad (14)$$

Si el flujo es turbulento, se toma la expresión clásica de Dittus y Boelter para flujo turbulento completamente desarrollado.

Por último, el calor que se transfiere de la tubería interior al exterior mostrado en la expresión (4), es el mismo que el calor que cede el fluido que pasa por el interior de la tubería, y el que capta o absorbe el fluido que pasa por el intercambiador y va a la bomba de calor.

$$\dot{Q} = m_{red} \cdot cp_{red} \cdot (T_{c1} - T_{c2}) = m_{bdc} \cdot cp_{bdc} \cdot (T_{f2} - T_{f1}) \quad (15)$$

En términos del cálculo, se estima que la temperatura del fluido frío a la entrada del intercambiador es 9°C inferior a la temperatura del fluido caliente a la entrada, con un mínimo de 3°C.

6. Resultados

Tomando todas las tuberías y colectores, y para un día tipo de cada mes (para considerar caudales y temperaturas característicos) se realiza el cálculo horario de la potencia por metro lineal que puede extraerse en cada tubería y colector. Todos los cálculos son teóricos, ya que no se dispone de una instalación piloto en la que parametrizar el comportamiento real del intercambiador para saneamiento o abastecimiento. Es decir, debe tenerse en cuenta, que en este primer análisis se prevé el cálculo teórico del potencial de aprovechamiento energético inicial. Como en la actualidad no se ha implantado ninguna instalación, no se considera el efecto aguas abajo que pueda tener la extracción de calor en un tramo de la red. Dicha acción se deberá realizarse en futuros trabajos de cara a mejorar la previsión del potencial de aprovechamiento (Toshiaki, 2017).

En la figura 10 se presenta los resultados para la red de abastecimiento, en la que cada color identifica un rango de potencia de aprovechamiento térmico lineal diferente, siendo el rojo el rango superior (más de 4,02 kW/m), y verde el inferior (menos de 0,54 kW/m). Se muestran los valores promediados para el mes de Enero, ya que es el mes en el que la potencia promedio es inferior.

Para el caso de la red de saneamiento (ver Figura 11), se comprueba que la potencia por metro aprovechable va siendo mayor según los colectores van recogiendo más caudal. Así, la estación depuradora aparecería en el extremo izquierdo de la imagen, al final de la línea de color rojo, ya que es el punto con mayor caudal. Para esta red, si bien la complejidad

de la ejecución es muy superior, el potencial nominal es mayor, obteniéndose unos valores máximos superiores.

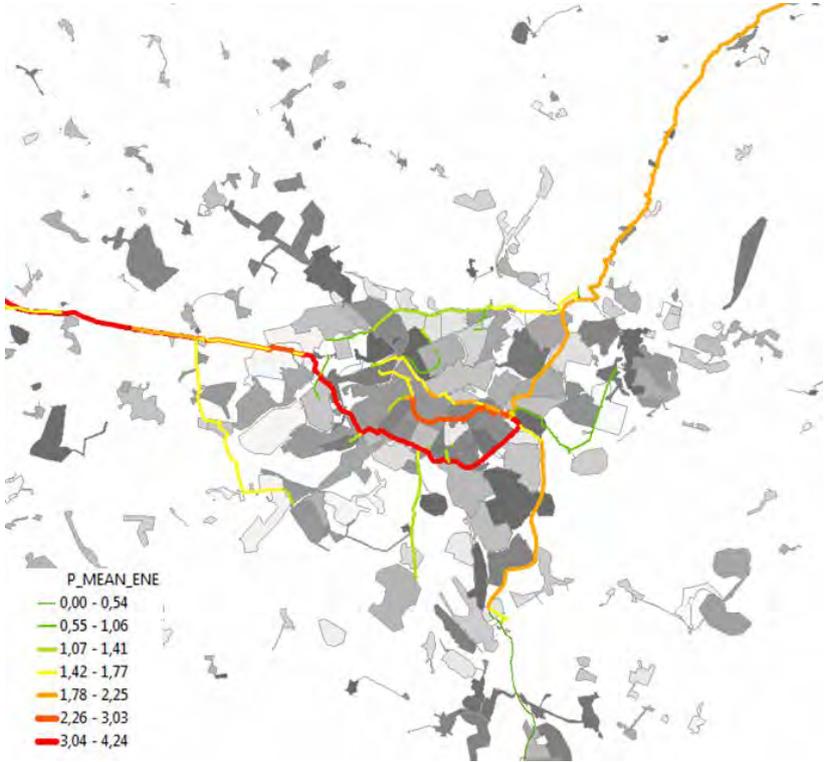


Figura 10: Potencia promedio para la red de abastecimiento (arriba) y saneamiento (abajo)

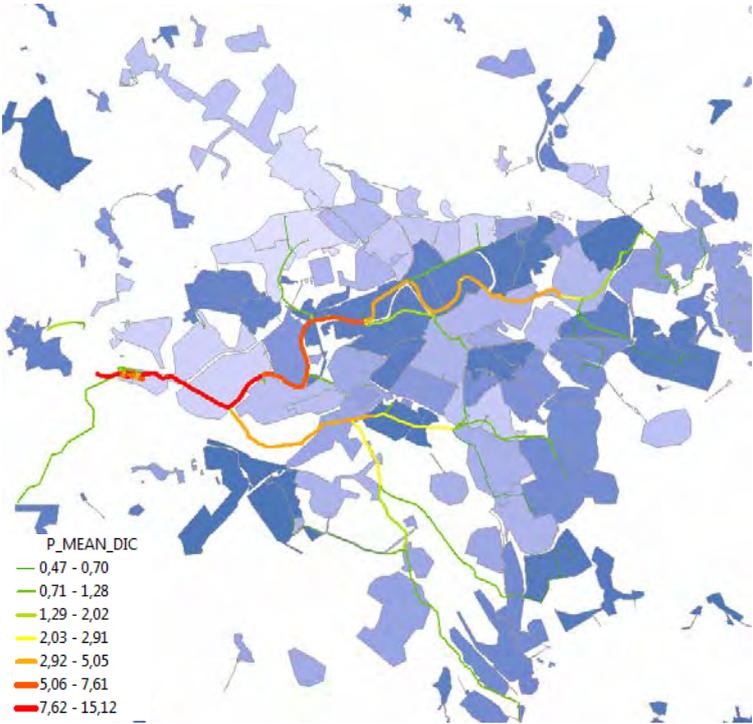


Figura 11: Potencia promedio para la red de abastecimiento (arriba) y saneamiento (abajo)

No puede realizarse una comparación directa entre ambas tecnologías, ya que el problema abordado es distinto. No obstante, se realiza una estimación para un diámetro DN400, determinando el promedio de la potencia proporcionada tanto para la red de abastecimiento como de saneamiento. El resultado indica que el intercambiador para saneamiento debe ser unas 2,34 veces superior al de abastecimiento para obtener la misma potencia por metro lineal, lógico si se tiene en cuenta la geometría de los intercambiadores (Figura 7), donde la sección del circuito del fluido caloportador que va a la bomba de calor es aproximadamente tres veces superior en el caso de abastecimiento con respecto del saneamiento.

7. Caso a estudio

Con los resultados obtenidos, se realizó el pre-dimensionado de una instalación. Para ello, se consideró un edificio de viviendas de 6 alturas, con 3 viviendas de 85 m² por planta, y con calidades constructivas de acuerdo con CTE-2006 para la zona climática de Pamplona, D1. El horario de climatización y las temperaturas de consigna en las viviendas se establecen de acuerdo con lo dispuesto en el documento de *“Condiciones de aceptación de procedimientos alternativos a LIDER y CALENER. Anexos”* (IDAE, 2009).

Con todo lo anterior, se obtuvieron las potencias de diseño de calefacción necesarias para todo el edificio, que puede verse en la figura 12. Dado que para la zona climática D1, las demandas de calefacción superan ampliamente a las demandas de refrigeración, se realiza

el dimensionado de acuerdo con la potencia de calefacción, que se concentra en los meses de diciembre, enero y febrero.

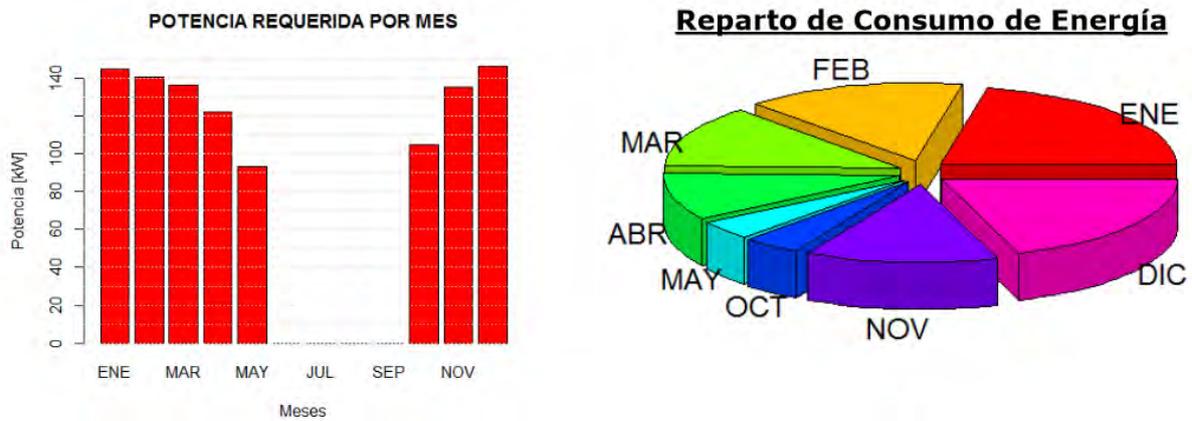


Figura 12: Potencia requerida por mes y reparto de consumos de energía para calefacción

Según la ecuaciones (1) y (2), se calcula la potencia necesaria para extraer de la red (abastecimiento/saneamiento) para satisfacer la demanda de calefacción en las viviendas:

$$Q_{red} = Q_{calefacción} \cdot \frac{COP-1}{COP} \quad (16)$$

Puede comprobarse en la figura 13 el comportamiento de esta expresión, ya que para un COP de 3,25, el calor que habría que extraer de la red de MCP en el foco frío sería el 69% del total de calefacción necesario.

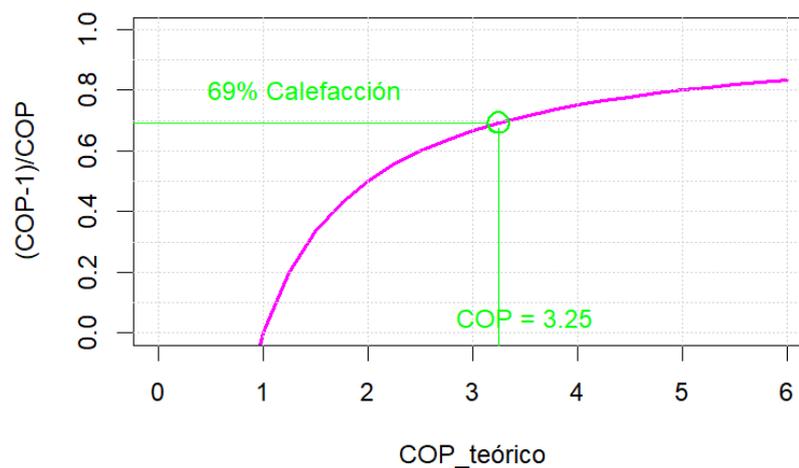


Figura 13: Aporte de energía desde la red de MCP según COP teórico

Queda patente en la ecuación anterior, la importancia de introducir un valor de COP válido pues su influencia en la potencia de extracción de calor de la red de agua que se

precisará es importante. Dicho COP, varía en función de la temperatura de evaporación y la de condensación. Para poder obtener la variación del COP según dichos valores, se toma lo indicado en el anterior documento (IDAE, 2009). En la figura 14 puede observarse la importancia de contar con una temperatura de evaporación lo más elevada posible.

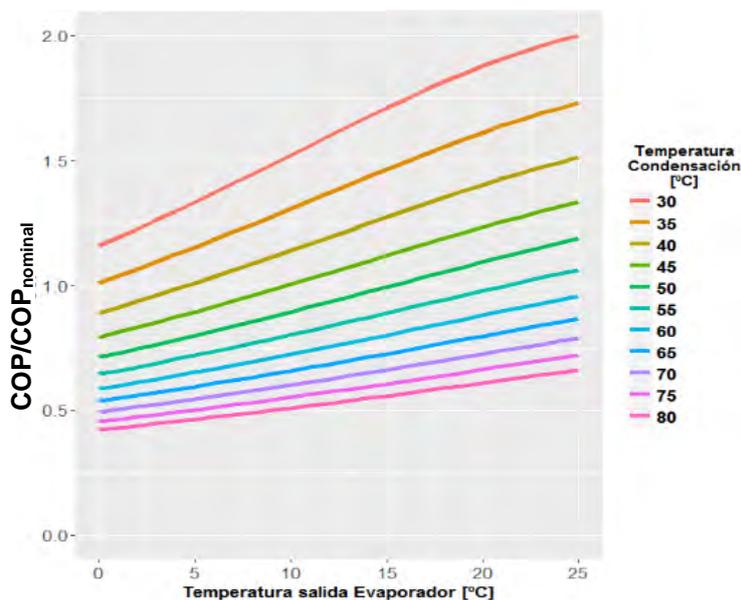


Figura 14: Variación del COP de la bomba de calor según la temp. condensación y evaporación

Se supuso el emplazamiento del edificio en un lugar concreto de la geografía pamplonesa con posibilidad de acceder tanto a la red de abastecimiento como a la de saneamiento (algo no muy habitual según puede apreciarse en la figura 10). Los diámetros de la tubería y el colector en las cercanías eran distintos, siendo DN1000 para abastecimiento, y DN400 para saneamiento. En la siguiente figura se muestran tanto las potencias por metro lineal de intercambiador que puede extraerse de la red de abastecimiento y saneamiento (líneas a

trazos), como las longitudes de intercambiador que se precisan para satisfacer las potencias mensuales calculadas.

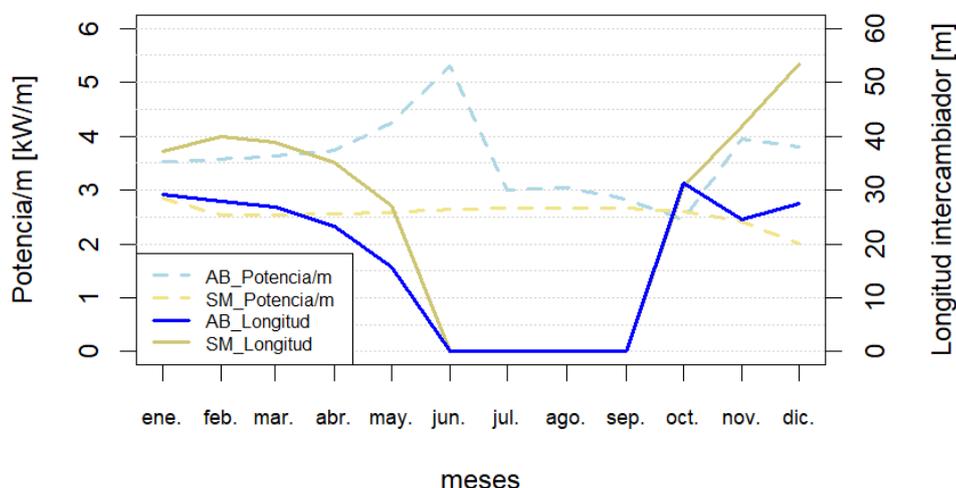


Figura 15: Ratio de Potencia/m y longitud de intercambio requerida por mes

Puede comprobarse que para la red de saneamiento, el ratio de potencia por metro para el mes de diciembre es el más bajo del año, por lo que al ser la potencia demanda similar en los meses más fríos, la mayor longitud de intercambiador se tiene para el mes de diciembre. Para el caso de la red de saneamiento, para los meses de verano hidrológico (julio, agosto, septiembre y octubre) el ratio de aprovechamiento se reduce de manera importante. Ello hace que la mayor longitud se obtenga para el mes de octubre. Como el funcionamiento normal en modo calefacción tiene lugar a partir de noviembre, no se consideran los resultados para octubre, tomando el valor del mes de enero. Por tanto, se precisan de 29,24 m de intercambiador en la red de abastecimiento, y de 53,41 m de intercambiador en la red de saneamiento. Al ser los tramos de intercambiador de 3 m de longitud, se emplearán 30 m para abastecimiento, y 54 m para saneamiento.

Por último, con los datos de temperaturas del agua en el intercambiador de calor, se comprueba la mejora en el COP de la bomba de calor agua-agua respecto a una bomba de calor aire-agua. Para ello, se toman dos modelos de bomba de calor de la marca CIAT, correspondientes a las series DYNACIAT y AQUACIAT, seleccionando los modelos de potencia de calefacción de 150 kW. El COP de cada bomba para unas condiciones de agua caliente 30/35°C (con aire exterior 7°C BS y agua fría 7/10°C) era de 3,47 y 5,57 para las bombas aire-agua y agua-agua respectivamente. Se consideró una temperatura de producción de agua caliente de 50°C, y según la temperatura del agua en el intercambiador de abastecimiento o saneamiento se modificó el punto de operación de la bomba de calor (IDAE, 2009). Se obtuvo en este caso, un ahorro en el consumo de electricidad del 24,4% para la bomba de calor agua-agua respecto a la bomba aire-agua para el caso de

abastecimiento; y un ahorro del consumo eléctrico del 28,4% para el caso de la bomba agua-agua con el intercambiador de saneamiento.

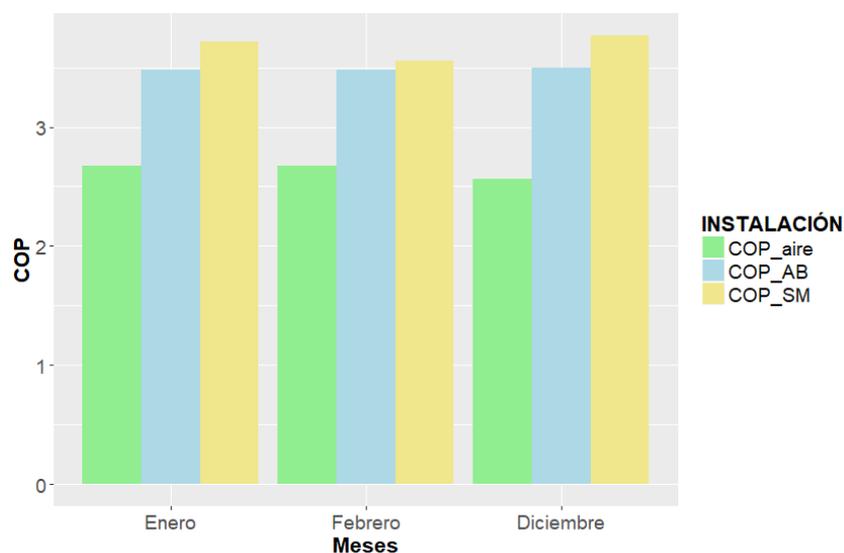


Figura 16: COP de las instalaciones por meses

8. Conclusiones

El presente trabajo pretende evaluar el potencial de aprovechamiento de energía de las redes de abastecimiento y saneamiento en la red de MCP. Se realiza un estudio puramente teórico exponiendo el sistema energético principal, en el que por medio de una bomba de calor, se aprovecha la energía residual de la red de agua.

Dado que se dispone de dos redes principales diferenciadas, y debido a que la tecnología existente en el mercado es más bien escasa y diferenciada para ambas redes, se desarrollan sendos modelos matemáticos teóricos para analizar la potencia que puede extraerse de la red con la casuística particular de la red de MCP, ya que la única información disponible al respecto considera unas condiciones particulares que podrían no tener nada que ver con la Comarca de Pamplona. En el caso de la red de abastecimiento, se propone un intercambiador integrado en la tubería que ocupa todo su perímetro. Para el caso de la red de saneamiento, se realiza el cálculo para un intercambiador integrado en la parte inferior del colector.

Se dispone de caudales y temperaturas horarios, bien a partir de mediciones como de simulaciones de caudal, así como de las características de tuberías y colectores, lo que ha permitido realizar el análisis del potencial de calor que es posible aprovechar de las redes de agua.

Con los resultados promedios, se ha elaborado un mapa en el que se muestra la potencia por metro lineal que puede extraerse de cada tubería y colector. El fin último es proporcionar al diseñador dicha información para que decida sobre la conveniencia de diseñar una instalación como la propuesta.

Para un mismo diámetro, el potencial de aprovechamiento en la red de abastecimiento es 2,34 veces superior, si bien por la estructura de la red de saneamiento que va recogiendo en colectores principales el caudal de otros colectores, la potencia máxima aprovechable es superior. Queda patente que el potencial de aprovechamiento de las redes tanto de abastecimiento como saneamiento es grande, si bien hasta la fecha apenas ha sido tenido en cuenta. Ante la creciente electrificación del suministro de energía

en los estados miembros de la Unión Europea unida a la alta producción eléctrica de origen renovable, supone una buena opción para reducir las emisiones de CO₂, en detrimento de otras tecnologías más contaminantes.

Por último, se ha realizado el pre-dimensionado para un edificio de viviendas, en el que se evalúa el aprovechamiento energético en un lugar concreto de la ciudad de Pamplona, resultando en ese caso una longitud de intercambio menor para la red de saneamiento. Con el empleo de una bomba de calor agua-agua puede reducirse el consumo de electricidad respecto a una bomba de calor aire-agua en un 24,4% en el caso de emplear el intercambiador con la red de abastecimiento, y de un 28,4% en el caso de saneamiento.

Como futuros pasos, consta la parametrización real de un intercambiador de abastecimiento y saneamiento, para ajustar el modelo teórico al caso real.

Referencias

Arif Hepbasli, Emrah Biyik, Orhan Ekren, Huseyin Gunerhan, Mustafa Araz. "A key review of wastewater source heat pump (WWSHP) systems". Energy Conversion and Management. 2014.

Asociación de Fabricantes de Climatización, AFEC. 2015. "La Bomba de Calor. Fundamentos, Tecnología y Casos Prácticos".

CIAT, <http://www.grupociat.es/>

Cipolla Sara Simona, Magionico Marco. "Heat recovery from urban wastewater: Analysis of the variability of flow rate and temperature". Energy and Buildings. 2014

Comisión Europea, "Marco sobre clima y energía para 2030". 2014 https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030_es

Decisión 2013/114/UE de la Comisión por la que se establecen las directrices para el cálculo por los Estados miembros de la energía renovable procedente de las bombas de calor de diferentes tecnologías. <https://www.boe.es/doue/2013/062/L00027-00035.pdf>

Directiva 2009/28/CE de 23 de abril de 2009 relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables. <https://www.boe.es/doue/2009/140/L00016-00062.pdf>

IDAE, 2009. "Condiciones de aceptación de procedimientos alternativos a LIDER y CALENER. Anexos"

http://www.minetad.gob.es/energia/desarrollo/EficienciaEnergetica/CertificacionEnergetica/DocumentosReconocidos/OtrosDocumentos/Calificaci%C3%B3n%20energ%C3%A9tica.%20Viviendas/Cond_acept_anexos.pdf

KASAG Swiss AG, <https://www.kasag.com/es/>

Mancomunidad de la Comarca de Pamplona, <http://www.mcp.es>

Ministerio de Fomento de España. 2017. "Áreas urbanas en España 2017". <https://www.fomento.gob.es/MFOM.CP.Web/handlers/pdfhandler.ashx?idpub=BAW050>

Mancomunidad de la Comarca de Pamplona. "Ciclo Integral del Agua". 2017 <http://www.mcp.es/sites/default/files/memorias/memoria2016/es/informe-gestion-2016/ciclo-integral-del-agua.htm>

Toshiaki Ichinose, Hiromitsu Kawahara. "Regional feasibility study on district sewage heat supply in Tokyo with geographic information system". Sustainable Cities and Society, 2017.

Oguzhan Culha, Huseyin Gunerhan, Emrah Biyik, Orhan Ekren, Arif Hepbasli. "Heat exchanger applications in wastewater source heat pumps for buildings: A key review". Energy and Buildings. 2015

Zhibin Liu, Liangdong Ma, Jili Zhang. "Application of a heat pump system using untreated urban sewage as a heat source". Applied Thermal Engineering, 2014.

Correspondencia (Para más información contacte con):

Nombre y Apellido: Javier Llorente

Teléfono: +34 948 25 28 00

Fax: + 34 948 27 07 74

E-mail: jllorente@cener.com

Cesión de derechos

Por la presente, y como autor del trabajo mencionado arriba, cedo al Palacio de Ferias y Congresos de Málaga una licencia no-exclusiva irrevocable para imprimir, reproducir, distribuir, transmitir o comunicar de cualquier manera dicho trabajo, incluyendo el derecho de hacer modificaciones de formato. Además, afirmo que esta cesión no lesiona los derechos de terceros.



Javier Ferrer
Enrique Alba
Universidad de Málaga

BIN-CT: SISTEMA INTELIGENTE PARA LA GESTIÓN DE LA RECOGIDA DE RESIDUOS URBANOS

Resumen

El rápido crecimiento demográfico junto con la concentración de la población en los núcleos urbanos más la cantidad cada vez mayor de residuos que generamos todos los días, son los factores que llevan al límite la capacidad de asimilación de los residuos por parte de la naturaleza. Por tanto, necesitamos medios tecnológicos para hacer una gestión óptima del proceso de recogida de residuos, que supone además un 70% del coste operacional en el tratamiento de residuos. En este artículo presentamos una herramienta inteligente no comercial, desarrollada por nuestro grupo universitario NEO, basada en algoritmos de aprendizaje computacional, que apoyada por datos pasados (históricos), presentes (sensores) y futuros (predicciones), planea las mejores rutas de recogida posibles.

El objetivo que podemos alcanzar gracias a nuestro sistema software es reducir los costes del servicio de recogida de residuos, gracias a la reducción del gasto de combustible y optimización del personal, a la vez que se aumenta la calidad de servicio al ciudadano y se reducen las emisiones de gases contaminantes. En este artículo mostramos las características de nuestra herramienta, ilustrando su funcionamiento con un caso de estudio real de una ciudad española. Podemos concluir que el uso de esta herramienta evita los viajes innecesarios a contenedores, y por tanto obtenemos una reducción de los costes totales y de las emisiones nocivas para el medioambiente.

Abstract

The fast demographic growth, together with the concentration of the population in cities, and the increasing amount of waste we generate every day, are factors that push to the limit the ability of waste assimilation by nature. Therefore, we need technological means to make an optimal management of the waste collection process, which represents 70% of the operational cost in waste treatment. In this article, we present a non-commercial intelligent tool, based on computational learning algorithms, which supported by past (historical), present (sensor) and future (predictions) data, plans the best routes for waste collection.

The objective of the system is the cost reduction of the waste collection service by means of the reduction in fuel and optimization of the staff, while at the same time the quality of service to the citizen is increased and the gas emissions are reduced. In this article we show the features of our tool, illustrating its operation with a real case study of a Spanish city. We can conclude that the use of this tool avoids unnecessary visits to containers, and therefore we obtain a reduction of total costs and harmful emissions to the environment.

Palabras clave: *gestión de residuos; reciclaje; predicción; software; planificación rutas; sistemas inteligentes*

Área temática: Ciclo de vida de la ciudad y sus construcciones

1. Introducción

La generación de residuos muestra un crecimiento imparable a nivel global y, por contra, la capacidad de nuestro planeta para asimilarlos es cada vez menor, convirtiéndose el tratamiento de los residuos en uno de los retos más complejos a los que se enfrentan las sociedades modernas (Al-Salem, Lettieri, & Baeyens, 2009). Además, el *sistema lineal* de nuestra economía (extracción, fabricación, utilización y eliminación) ha alcanzado sus límites y se empieza a vislumbrar el agotamiento de una serie de recursos naturales. Por tanto, actualmente se está implantando un modelo de *economía circular* que consigue convertir nuestros residuos en materias primas, paradigma de un sistema de futuro sostenible.

A pesar del compromiso social y gubernamental, apenas existen medios tecnológicos para hacer una gestión óptima del proceso de recogida de residuos, que supone un 70% del coste operacional en el tratamiento de residuos (Teixeira, Antunes, & de Sousa, 2004). En este trabajo proponemos una herramienta inteligente para la gestión de la recogida de residuos sólidos urbanos. El sistema es doblemente inteligente, ya que integra algoritmos para pronosticar el porcentaje de llenado de los contenedores de residuos, más la posterior generación óptima de rutas de recogida para los camiones. Es decir, nuestro sistema software resuelve los dos grandes problemas a los que se enfrentan los servicios de recogida: 1) ¿qué contenedores se deben recoger? y 2) ¿en qué orden se visitan para minimizar el coste?

Para resolver la primera de estas preguntas hemos necesitado apoyarnos en el aprendizaje automático computacional (un nuevo tipo de *machine learning*) para estimar el porcentaje de llenado de cada contenedor, gracias al uso de datos históricos, y así saber cuándo debemos ir a recogerlo. Esta predicción se puede realizar a corto o largo plazo, considerando estacionalidad, y con la capacidad de realimentar el modelo matemático con los nuevos datos que se generan diariamente. Cabe destacar que la predicción de llenado para todos los contenedores individualmente (grano fino) es una característica que no se implementa en ninguna herramienta comercial existente. Adicionalmente, la herramienta interacciona con un sistema IoT (*Internet of Things*) para conocer los llenados en tiempo real de los contenedores equipados con sensores volumétricos, y es una herramienta fundamental para recabar datos y utilizarlos en la decisión de incluirlos en las rutas de recogida cuando éstas se generan.

La generación de rutas (de recogida de residuos en nuestro caso) es un problema combinatorio bien conocido llamado en inglés *Vehicle Routing Problem - VRP* (Dantzig & Ramser, 1959). Para resolver la segunda pregunta vamos a generar las rutas óptimas para visitar todos los emplazamientos de los contenedores, teniendo en cuenta multitud de restricciones como la capacidad de los camiones, la cantidad de residuos recogida y las características del emplazamiento del contenedor, entre otras.

La planificación de las rutas de recogidas de residuos tiene, por tanto, un amplio abanico de variantes y restricciones que por una parte lo hace inmanejable para una persona, y por otro nos da un gran margen de mejora al tratarlo con algoritmos de forma automática. Esta mejora se va a traducir en una disminución de los costes del servicio, una mejora medioambiental y una mejora en el servicio al ciudadano, en cuanto a calidad y en cuanto a costes. Además, debemos tener en cuenta que el sistema de recogida actual está en discusión, ya que tenemos un sistema que en ocasiones efectúa viajes innecesarios a contenedores semi-vacíos. Y es que no podemos obviar las emisiones contaminantes generadas por los viajes extra, que podrían perjudicar más el medio ambiente, que el beneficio de su recolección. Esto es

especialmente crítico en el caso de la recogida selectiva (plástico, papel, vidrio,...), donde el volumen de residuos suele ser menor que en el contenedor de residuos orgánicos. En ese caso una buena planificación de las recogidas es un aspecto aún más fundamental.

Las principales contribuciones de este artículo son las siguientes:

- Propuesta de sistema inteligente llamado BIN-CT para la generación de rutas de recogidas de residuos urbanos.
- Comparativa de tres algoritmos de aprendizaje computacional para la generación de predicciones de llenado de contenedores a partir de datos históricos.
- Caso de estudio de una ciudad real para ilustrar el comportamiento del sistema BIN-CT con 217 contenedores.

El resto del artículo se organiza de la siguiente manera. En la Sección 2 describimos el estado del arte actual del problema de la recogida de residuos, haciendo hincapié en las diferentes variantes que se tratan en la literatura. En la Sección 3, describimos los problemas asociados con la recogida de residuos urbanos que tratamos en este artículo. La Sección 4 la dedicamos a comentar el sistema inteligente desarrollado, comentando en detalle sus componentes y funcionalidades más interesantes. La Sección 5 la dedicamos a la presentación y discusión de los resultados obtenidos en un caso de estudio real sobre recogida selectiva, particularmente la recogida de papel/cartón. Para finalizar, destacamos una serie de conclusiones y líneas de trabajo futuras.

2. Estado del Arte

El desarrollo poco sostenible de la mayoría de naciones ha creado un problema por la creciente generación de residuos que debe ser resuelto, donde se distinguen muchas fases desde la fabricación hasta el reciclado, pasando por la recogida, transporte, procesado, reciclado, almacenamiento y monitorización de residuos. En este trabajo nos centramos en la recogida de residuos urbanos, ya que es uno de los procesos más costosos cuando queremos volver a dar una nueva vida a los residuos (concepto en boga denominado economía circular).

Tradicionalmente la recolección de residuos sólidos se realizaba sin analizar previamente la demanda o las rutas de los vehículos, realizando esta labor los conductores de los vehículos aunque las soluciones estuvieran lejos de ser óptimas. Muy al contrario, actualmente conocemos que este proceso de recogida tiene innumerables variantes y restricciones que han dado lugar a multitud de estudios en los últimos años debido a su importancia. Los trabajos existentes se pueden clasificar, entre otras formas, atendiendo al tipo de residuo que se trata: residuos residenciales comúnmente conocidos como basura (Garvin, Cohen, & Dwyer, 2011), residuos industriales donde los clientes están más dispersos y la cantidad de residuo es mayor (Sahoo, Kim, Kim, Kraas, & Popov Jr., 2005), residuos reciclables (Dat, Truc Linh, Chou, & Yu, 2012) cada vez más importantes para nuestra sociedad y residuos peligrosos donde se minimiza la probabilidad de daños (Alagöz & Kocasoy, 2008).

El problema de la recogida de residuos municipales (Beliën, De Boeck, & Van Ackere, 2014), también se ha estudiado desde la perspectiva de las autoridades locales. A nivel municipal o incluso desde las diputaciones necesitan estudios globales para cuantificar los residuos generados en un periodo de tiempo y poder gestionarlos. Particularmente, en la literatura podemos encontrar predicciones para una ciudad completa como el presentado por Xu et al. (Xu, Gao, Cui, & Liu, 2013) de la ciudad china de Xiamen. La diferencia con nuestro enfoque es que ellos predicen sobre cantidades de residuos globalmente (grano grueso), mientras que nosotros generamos una predicción por cada contenedor involucrado (grano fino). Esto supone un aumento considerable de la complejidad del problema que se resuelve, debido a

que hay que considerar múltiples aspectos como la localización, las costumbres de los ciudadanos, la densidad poblacional del área, etc. En esta línea, también se ha estudiado el impacto de la intervención de las autoridades locales en la recogida de residuos (Cole, Quddus, Wheatley, Osmani, & Kay, 2014), siendo esta relevante a medio-largo plazo.

Dependiendo del lugar donde se produce la retirada de los residuos también existen diferentes variantes de este problema. Existen las recolecciones comunales donde la autoridad local identifica un punto compartido por la comunidad (Tung & Pinnoi, 2000), es el caso de los llamados “puntos limpios”. En el otro extremo se encuentra las recogidas “de bordillo” (Sniezek & Bodin, 2006), donde los propietarios sacan la basura a la puerta de su casa. El caso intermedio, que es el estudiado aquí, es la recogida de contenedores (Bodin, Mingozi, Baldacci, & Ball, 2000) que sirven a varias urbanizaciones o manzanas.

En las ciudades medianas ya podemos hablar de varios cientos o miles de estos contenedores, por lo que son necesarios métodos de computación avanzados para alcanzar la solución óptima. En el pasado, varios métodos de resolución exacta como el “*Branch and Bound*” o basados en programación matemática (Arribas, Blazquez, & Lamas, 2010) se han utilizado, aunque el tiempo de computación se vuelve exponencial por el número de elementos necesarios para la resolución, por lo que es recomendable el uso de heurísticas. A pesar de que ya se hayan explorado algunos algoritmos metaheurísticos como las colonias de hormigas o los algoritmos genéticos (Buenrostro-Delgado, Ortega-Rodriguez, Clemitshaw, González-Razo, & Hernández-Paniagua, 2015), aún existe margen de mejora cuando uno se enfrenta al problema de la recogida de residuos a grano tan fino como el que utilizamos en nuestro enfoque, analizando cada contenedor como una entidad individual.

El proceso de recogida de residuos implica a muchos actores como son las autoridades, los ciudadanos, la empresa que realiza el servicio y los trabajadores. Dependiendo del interesado, existen diferentes objetivos que se pueden optimizar. Entre ellos destacamos el número de vehículos necesarios para realizar el trabajo (Ombuki-Berman, Runka, & Hanshar, 2007), el coste total (Arribas et al., 2010), el impacto medioambiental (Tavares, Zsigraiova, Semiao, & Carvalho, 2009), el personal necesario (Baudach, Chmielewski, & Clausen, s. f.), la longitud de las rutas (Ustundag & Cevikcan, 2008) o el tiempo total de la recolección (Arribas et al., 2010). Nuestro enfoque considera varios de estos objetivos a la vez, tratando de encontrar una solución que minimice el número de vehículos necesarios, el coste total de la recogida, la longitud de las rutas, y por tanto el impacto medioambiental.

3. El Problema de Recogida de Residuos Urbanos

El problema de la recogida de residuos es un problema global que afecta a la mayoría de las ciudades del mundo. De hecho, este problema se encuadra dentro de la iniciativa Horizonte 2020 (*Horizon 2020*) y Ciudad Inteligente (*Smart City*) para la innovación y la investigación, promovido por la Unión Europea: el concepto de reducir el consumo energético y aprovechar mejor los recursos se ha convertido en un arma central para combatir los rigores de la crisis económica. Concretamente, uno de los objetivos que tiene la iniciativa *Smart City* es disminuir la emisión de gases de efecto invernadero, emplear de manera sostenible los recursos disponibles y gestionar eficientemente las fuentes energéticas.

Nos enfrentamos, por tanto, a un problema que consiste en planificar cómo se va a realizar la recogida de residuos en un área determinada. Básicamente esta tarea consiste en determinar la asignación de los recursos disponibles (vehículos y conductores) a rutas de recogida, es decir, queremos que se visiten los contenedores de residuos que nos convenga recoger en el momento más adecuado (idealmente con porcentaje de llenado cercano al 100%). Entre las labores más importantes que hay que realizar podemos destacar la generación de las rutas de recogida por jornada y por tipo de residuo. No es necesario determinar la frecuencia de visitas que necesita un determinado contenedor, sino que las predicciones de llenado serán

las que nos ayuden a decidir si un contenedor en particular será recogido en una jornada o no. La generación de predicciones es realmente compleja, ya que necesitamos modelar el comportamiento de la población que deposita sus residuos en ese determinado contenedor.

La complejidad global de este problema viene derivada de la cantidad de restricciones que se le pueden aplicar al modelo, de forma que a más restricciones tenidas en cuenta, mayor realismo se consigue y mejor será la solución encontrada. Las restricciones que tenemos en cuenta son muy diversas. Con respecto al vehículo podemos restringir la capacidad del mismo, si disponemos de uno o más vehículos, si estos son diferentes o iguales, y si son de diferente tamaño, ya que en ciertas calles los vehículos grandes no pueden ser usados. También podemos considerar restricciones legales, como el número de horas que pueden trabajar los empleados, o restricciones políticas que pueden ser muy diversas. Por ejemplo obtener un porcentaje de residuos reciclables o la consideración de ventanas horarias para la recogida en determinados lugares, de manera que sólo a ciertas horas está permitida la recogida. Todas estas restricciones hacen que el problema sea difícilmente abarcable por técnicas tradicionales y menos aún por una persona.

4. El Sistema BIN-CT

El sistema BIN-CT propuesto para mejorar la planificación de la recogida de residuos se ha desarrollado dividiendo la funcionalidad en cuatro módulos claramente diferenciados y que podemos observar en la **Figura 1**.

En esta sección vamos a detallar las capacidades de nuestro software, así como su importancia a la hora de resolver una instancia del problema de recogida de residuos urbanos. Los cuatro módulos de los que se compone este paquete software son: módulo de manejo de datos, módulo de decisiones inteligentes, módulo de generación de rutas y módulo de visualización.

4.1. Módulo de Manejo de Datos

Toda la información necesaria para la ejecución del programa (proveniente de la empresa que use el sistema) se puede cargar de una base de datos. Esto nos permite obtener de forma rápida la información necesaria desde una base de datos remota. Además, una vez concluida la ejecución del programa de optimización de rutas, podemos almacenar la mejor solución en la base de datos para su posterior consulta y visualización.

La generación de las matrices de distancia y tiempos entre contenedores es una información esencial para generar las rutas realistas. El módulo de datos también es el encargado de solicitar esta información, que obtenemos gracias a la API de Google Maps, para que las rutas generadas sean lo más precisas posible.

Finalmente, también se almacenan los datos de capacidad obtenidos con los sensores para construir un historial de cada uno de los contenedores con sensor instalado. Nos permite utilizar esta información para clasificar los contenedores como de alto, medio y bajo uso y generar predicciones más acertadas.

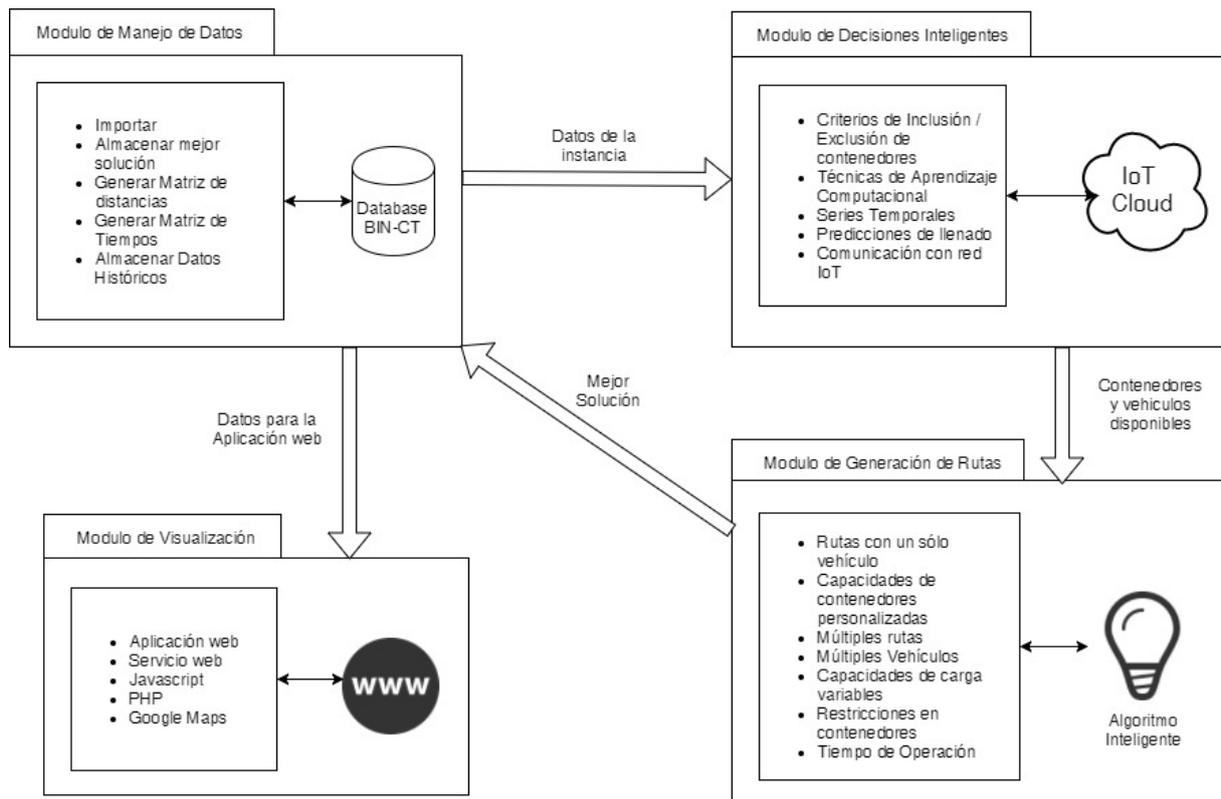


Figura 1: Diagrama del Sistema Software BIN-CT

4.2. Módulo de Decisiones Inteligentes

La característica fundamental de nuestro software es la capacidad para predecir el aporte diario para cada uno de los contenedores que forman parte del conjunto analizado. Hemos realizado un modelado matemático individualizado de cada contenedor usando la biblioteca de *machine learning* de Weka (Frank, Hall, & Witten, 2016) para la generación de pronósticos sobre el nivel de llenado de los mismos, partiendo de datos históricos registrados. Esto nos permite generar predicciones de llenado para los contenedores no monitorizados con sensores.

En este módulo también hemos definido los criterios de inclusión /exclusión utilizados para la toma de decisión acerca de los contenedores que van a ser recogidos en las rutas generadas. Los criterios de inclusión/exclusión se pueden definir atendiendo a: capacidad de contenedores, capacidad de vehículos, número de vehículos, compatibilidad de vehículos/contenedores, pronóstico realizado y lectura real de los sensores si fuera posible. Además, dado un conjunto de contenedores y un criterio, tenemos la posibilidad de forzar la inclusión de algunos contenedores con mayor prioridad en las rutas generadas, pudiendo quedar algunos excluidos debido a los criterios y restricciones definidos.

4.3. Módulo de Generación de Rutas

Este módulo tiene como funcionalidad principal la generación de rutas óptimas para la recogida de residuos. Dado un conjunto de contenedores, usamos un algoritmo de optimización basado en el principio de ruina y recreación (Schrimpf, Schneider, Stamm-Wilbrandt, & Dueck, 2000) que nos permite generar rutas de recogida eficientes, teniendo en cuenta la distancia y el tiempo de conducción entre ellos.

En general todos los contenedores suelen tener la misma capacidad, pero a medida que avanza el tiempo, en las ciudades tenemos contenedores diferentes, y por tanto con diferentes

capacidades. Nuestro software considera contenedores de distinto tamaño y por lo tanto, diferente capacidad. Se gestiona la capacidad de cada uno de forma individualizada, y esto nos permite estimar la carga total que va a recoger el vehículo, ya que no podemos exceder este límite. Además, las flotas de vehículos no sólo la forman vehículos idénticos sino que las flotas de vehículos son heterogéneas, por lo que se consideran los vehículos de forma individualizada. Por ejemplo, podemos asignar un número mayor de contenedores a los vehículos con mayor capacidad.

En ocasiones se producen casos especiales donde hay que tener en cuenta la compatibilidad entre contenedor/vehículo. Este caso ocurre, por ejemplo, cuando un contenedor tiene que ser recogido por un vehículo de tamaño pequeño. Nuestro software nos permite tener en cuenta esta restricción para generar rutas válidas. Además, esta característica también puede influir en el tiempo de operación por contenedor, que es el tiempo que se tarda desde que el camión para delante de un contenedor hasta que éste reemprende la marcha. Este tiempo se asigna dependiendo de la ubicación o características del contenedor a recoger. Esta característica repercute beneficiosamente en que el tiempo total de recogida estimado sea más realista.

4.4. Módulo de Visualización

La visualización de las soluciones se realiza en un mapa navegable HTML. El software genera soluciones para uno o más días, y éstas pueden visualizarse en un navegador web. En la **Figura 2** se puede ver el interfaz de la aplicación web, que además podemos consultar online en la dirección <http://mallba3.lcc.uma.es/binct/>. En la parte principal se muestra una parte de una solución obtenida para dos vehículos, una ruta de color rojo y otra ruta de color negro, para dos camiones diferentes. Además, podemos observar los contenedores marcados en rojo, que serán aquellos cuya predicción indica un porcentaje de llenado superior al 80%.

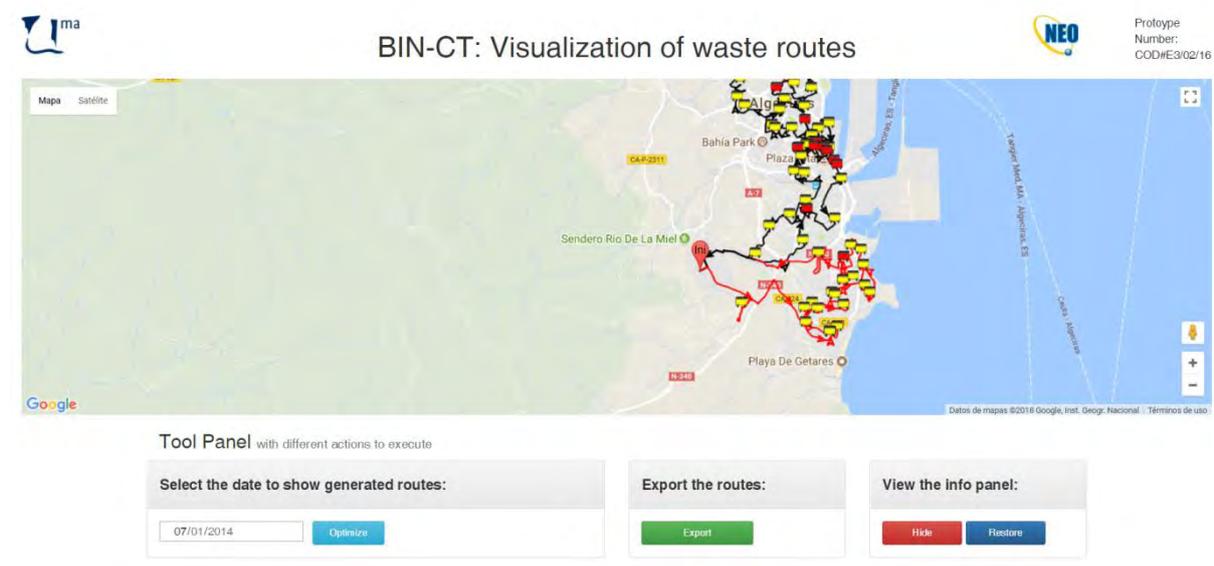


Figura 2: Interfaz de la aplicación BIN-CT

Las soluciones pueden ser obtenidas desde cualquier dispositivo móvil y su interfaz se adapta a los dispositivos móviles. Esta característica es especialmente deseable para la consulta por parte de los conductores de los camiones de recogida, en el caso de que les surja alguna duda con respecto a la ruta que deben seguir.

5. Caso de Estudio

En este artículo vamos a ilustrar el comportamiento de nuestra herramienta software con un caso de estudio real de una ciudad costera andaluza, donde ponemos de manifiesto las bondades de nuestro enfoque, siendo este efectivo y realista al mismo tiempo. En este caso vamos a llevar a cabo dos experimentos diferentes. En primer lugar vamos a centrarnos en el funcionamiento del módulo de predicciones, que es la parte más novedosa de nuestro sistema y que nos va a permitir conseguir el mayor ahorro en el funcionamiento de nuestro servicio de recogida. Este primer experimento va a consistir en la comparativa de tres algoritmos diferentes para generar predicciones. Por su parte, el segundo experimento será la generación de rutas para una jornada de trabajo, partiendo del estado que tuvieran los contenedores, es decir, van a tener estados de llenado diferentes que serán complementados con la predicción para el día siguiente. De esta manera pretendemos poner de manifiesto que nuestro enfoque es realista, y por tanto nuestras soluciones lo serán también.

Nuestro caso de estudio considera 217 contenedores azules dedicados a la recogida de papel/cartón del área metropolitana de una ciudad andaluza. La elección de una instancia de recogida selectiva es más atractiva para demostrar la potencia de nuestro enfoque, ya que la frecuencia de recogida de estos contenedores es muy variable, y no suele ser diaria como ocurre con la mayoría de contenedores de residuos orgánicos. La instancia estudiada de este problema tiene las siguientes características:

Característica	Valor
Número de contenedores	217 unidades
Número de vehículos	2 unidades
Tiempo de operación	210 segundos
Capacidad vehículo 1	2000 kg
Capacidad vehículo 2	5000 kg
Datos históricos	11 meses
Horizonte pronóstico	1 mes

Tabla 1: Características del caso de estudio

En el primer experimento hemos comparado los siguientes algoritmos de series temporales: regresión lineal, proceso gaussiano y SMOreg, todos disponibles en la biblioteca de series temporales de Weka. En este experimento utilizamos 11 meses de datos, que indican para cada día el porcentaje estimado de llenado del contenedor. Este dato es aportado por el conductor del vehículo si se ha pasado por este contenedor, y no tendremos dato alguno si ese día no se ha realizado su recogida. Por tanto, el sistema debe deducir qué ha ocurrido en los días que no tenemos datos. Para aliviar este problema, hemos realizado un pre-procesamiento de los datos que nos ha permitido obtener el incremento de carga estimado de cada uno de los contenedores de la instancia para cada día. A partir de estos datos, hemos generado las predicciones diarias para el siguiente mes. Los resultados indican que el algoritmo de aprendizaje basado en procesos gaussianos es el mejor algoritmo de los tres, obteniendo tan sólo un 3'83% de error absoluto medio en sus predicciones diarias de llenado. Por su parte, el algoritmo basado en regresión lineal tiene un error absoluto medio de un 7,41% y el algoritmo SMOreg de un 9,52%. Tras realizar el test estadístico de Kruskal-Wallis (con corrección de Bonferroni para comparar más de dos muestras) con una confianza del

95% podemos afirmar que existen diferencias significativas entre los resultados del algoritmo basado en procesos gaussianos con los otros dos algoritmos de la comparación.

Como principal conclusión del primer experimento podemos extraer que la estimación proporcionada por el mejor algoritmo es más que aceptable, con menos de un 4% de error absoluto medio, cifra que raramente podría influir en la decisión de recoger un contenedor de forma prioritaria. Por tanto, el algoritmo que decidimos utilizar para el segundo experimento es el basado en procesos gaussianos.

En el segundo experimento queremos ilustrar el comportamiento general del sistema para el caso de dos vehículos diferentes, considerando todas las demás características especificadas en la **Tabla 1**. Una vez que el sistema realiza las predicciones para el día siguiente, y se acumulan con el llenado actual, se elige el subconjunto de contenedores que queremos recoger con el siguiente criterio de inclusión/exclusión. Aquellos con un porcentaje de llenado superior al 60% se consideran opcionales y aquellos con llenado superior al 80% se marcan como obligatorios para su recogida. En nuestro caso de estudio, este criterio da lugar a un subconjunto de 91 contenedores a recoger por dos vehículos. Tras la ejecución del algoritmo de generación de rutas, obtenemos una ruta donde se deben recoger 55 contenedores, y la debe realizar el camión más grande (capacidad de 5000kg) y otra para el camión pequeño, con capacidad para 2000kg, que recoge exactamente 20 contenedores. Por lo tanto, nuestra solución es capaz de recoger la mayoría de los contenedores y aprovechar al máximo la capacidad de los vehículos, siendo tan sólo 14 los contenedores opcionales que no debemos recoger. Por otra parte, el sistema nos proporciona una información muy precisa de la duración de las rutas, teniendo la ruta más larga una duración estimada de 5 horas, 23 minutos y 21 segundos, mientras que la ruta más corta tendrá una duración de 2 horas, 9 minutos y 10 segundos.

Tras el estudio de estas soluciones por parte de la empresa que nos ha proporcionado los datos de este caso de estudio, podemos concluir que el sistema propuesto genera soluciones realistas y que reproduce con bastante fiabilidad lo que ocurre en la realidad. Además, gracias a las predicciones, no hemos considerado 126 contenedores. Con bastante probabilidad varios de estos contenedores forman parte de la ruta predefinida para esta jornada y por lo tanto, hemos ahorrado viajes innecesarios con el consiguiente ahorro en coste de la ruta y emisiones de gases contaminantes.

6. Conclusiones y Trabajo Futuro

Nuestro software es un sistema inteligente diseñado para utilizar el conocimiento y la tecnología que es parte del estado del arte en investigación actualmente en sostenibilidad urbana. Estamos convencidos de que nuestro sistema inteligente va a ayudar a mejorar la calidad de vida de la ciudad donde se implante, gracias a la reducción de y al tratamiento eficiente de los residuos generados, lo que va a constituir una vía para alcanzar la sostenibilidad en una ciudad.

Nuestro sistema software tiene como objetivo principal reducir los costes de un servicio de recogida de residuos, a la vez que se aumenta la calidad de servicio al ciudadano, ya que nuestro software ordena recoger los contenedores por encima del 80% y así evitamos los inconvenientes de los molestos desbordamientos de contenedores. En el caso de estudio que hemos analizado en este trabajo, probamos que las soluciones generadas son realistas, a la vez que son más eficientes porque no consideran los contenedores que están por debajo del 60% una vez que hemos sumado las predicciones para el día siguiente. Además, las predicciones diarias son acertadas en un 96,17%, lo que indica que se proporcionan predicciones bastante fiables para los cálculos que necesitamos hacer en nuestro sistema.

BIN-CT tiene una aplicación directa por las empresas concesionarias de los servicios de recogida de residuos, tanto en ciudades españolas como de cualquier parte del mundo. Este sistema software no comercial, basado en algoritmos de aprendizaje computacional, no requiere de una inversión grande en infraestructura, por lo que sería muy interesante para dichas empresas. Existe también una parte científica interesante (investigación en series temporales, predicciones, sensores IoT, algoritmos eficientes, ...) que a las empresas que se interesen por el sistema propuesto aquí, les podría dar el salto de calidad y distinción que se busca en un mercado tan competitivo como el actual.

Como trabajo futuro, y gracias a la forma de construcción del sistema, podemos destacar la posible integración de un número indeterminado de sensores (que puede crecer según necesidades), como en todo sistema ciberfísico, para medir la cantidad de residuo del contenedor. Gracias a esto, en un futuro se podrían tomar decisiones en tiempo real incluso durante las rutas que realicen los camiones de recogida.

7. Agradecimientos

Queremos agradecer su asesoramiento sobre recogida de residuos al departamento de medioambiente de la empresa Hermanos Padilla, S.L. Además, esta investigación ha sido parcialmente financiada por el Ministerio de Economía y Competitividad, y los proyectos FEDER con códigos TIN2014-57341-R (<http://moveon.lcc.uma.es>), TIN2016-81766-REDT (<http://cirti.es>), y TIN2017-88213-R (<http://6city.lcc.uma.es>), a la Universidad de Málaga por el proyecto con código COD # E3/02/16 y Andalucía Tech.

8. Referencias

- Al-Salem, S. M., Lettieri, P., & Baeyens, J. (2009). Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review. *Waste Management*, 29(10), 2625-2643. <http://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.06.004>
- Alagöz, A. Z., & Kocasoy, G. (2008). Improvement and modification of the routing system for the health-care waste collection and transportation in İstanbul. *Waste Management*, 28(8), 1461-1471. <http://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.08.024>
- Arribas, C. A., Blazquez, C. A., & Lamas, A. (2010). Urban solid waste collection system using mathematical modelling and tools of geographic information systems. *Waste Management & Research*, 28(4), 355-363. <http://doi.org/10.1177/0734242X09353435>
- Baudach, J., Chmielewski, A., & Clausen, U. (s. f.). Integrated Vehicle Routing and Crew Scheduling (IVRCS) in Waste Management Part II. Recuperado a partir de <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/citations;jsessionid=06DA06F60C8512230D8204E17C12DFCB?doi=10.1.1.687.8694>
- Beliën, J., De Boeck, L., & Van Ackere, J. (2014). Municipal Solid Waste Collection and Management Problems: A Literature Review. *Transportation Science*, 48(1), 78-102. <http://doi.org/10.1287/trsc.1120.0448>
- Bodin, L., Mingozzi, A., Baldacci, R., & Ball, M. (2000). The rollon-rolloff vehicle routing problem. *Transportation Science*, 34(3), 271-288. <http://doi.org/10.1287/trsc.34.3.271.12301>
- Buenrostro-Delgado, O., Ortega-Rodríguez, J. M., Clemitshaw, K. C., González-Razo, C., & Hernández-Paniagua, I. Y. (2015). Use of genetic algorithms to improve the solid waste collection service in an urban area. *Waste management (New York, N.Y.)*, 41, 20-7. <http://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.03.026>

- Cole, C., Quddus, M., Wheatley, A., Osmani, M., & Kay, K. (2014). 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), 266-72. <http://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.10.018>
- Dantzig, G. B., & Ramser, J. H. (1959). The Truck Dispatching Problem. *Management Science*, 6(1), 80-91. <http://doi.org/10.1287/mnsc.6.1.80>
- Dat, L. Q., Truc Linh, D. T., Chou, S. Y., & Yu, V. F. (2012). Optimizing reverse logistic costs for recycling end-of-life electrical and electronic products. *Expert Systems with Applications*, 39(7), 6380-6387. <http://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.12.031>
- Frank, E., Hall, M. A., & Witten, I. H. (2016). *The WEKA Workbench. Morgan Kaufmann, Fourth Edition*. Recuperado a partir de https://www.cs.waikato.ac.nz/ml/weka/Witten_et_al_2016_appendix.pdf
- Garvin, B. J., Cohen, M., & Dwyer, M. B. (2011). Evaluating improvements to a meta-heuristic search for constrained interaction testing. *Empirical Software Engineering*, 16(1), 61-102.
- Ombuki-Berman, B. M., Runka, A., & Hanshar, F. T. (2007). Waste collection vehicle routing problem with time windows using multi-objective genetic algorithms. *Proceedings of the Third IASTED International Conference on Computational Intelligence*, 91-97. Recuperado a partir de <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-54949135697&partnerID=40&md5=1094902e796768500f3f4cd9980931a4>
- Sahoo, S., Kim, S., Kim, B.-I., Kraas, B., & Popov Jr., A. (2005). Routing Optimization for Waste Management. *Interfaces*, 35(1), 24-36. <http://doi.org/10.1287/inte.1040.0109>
- Schrimpf, G., Schneider, J., Stamm-Wilbrandt, H., & Dueck, G. (2000). Record Breaking Optimization Results Using the Ruin and Recreate Principle. *Journal of Computational Physics*, 159(2), 139-171. <http://doi.org/10.1006/jcph.1999.6413>
- Sniezek, J., & Bodin, L. (2006). 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), 33-58. <http://doi.org/10.1007/s10479-006-0006-y>
- Tavares, G., Zsigraiova, Z., Semiao, V., & Carvalho, M. G. (2009). Optimisation of MSW collection routes for minimum fuel consumption using 3D GIS modelling. *Waste Management*, 29(3), 1176-1185. <http://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.07.013>
- Teixeira, J., Antunes, A. P., & de Sousa, J. P. (2004). Recyclable waste collection planning—a case study. *European Journal of Operational Research*, 158(3), 543-554. [http://doi.org/10.1016/S0377-2217\(03\)00379-5](http://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00379-5)
- Tung, D. V., & Pinnoi, A. (2000). Vehicle routing-scheduling for waste collection in Hanoi. *European Journal of Operational Research*, 125(3), 449-468. [http://doi.org/10.1016/S0377-2217\(99\)00408-7](http://doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00408-7)
- Ustundag, A., & Cevikcan, E. (2008). Vehicle Route Optimization for Rfid Integrated Waste Collection System. *International Journal of Information Technology & Decision Making*, 7(4), 611-625. <http://doi.org/10.1142/S0219622008003125>
- Xu, L., Gao, P., Cui, S., & Liu, C. (2013). A hybrid procedure for MSW generation forecasting at multiple time scales in Xiamen City, China. *Waste management (New York, N.Y.)*, 33(6), 1324-31. <http://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.02.012>

Correspondencia (Para más información contacte con):

Nombre y Apellido: Javier Ferrer

Teléfono: +34 952133303

Fax: +34 952131397

E-mail: ferrer@lcc.uma.es

Cesión de Derechos

Por la presente, y como autor del trabajo mencionado arriba, cedo al Palacio de Ferias y Congresos de Málaga una licencia no-exclusiva irrevocable para imprimir, reproducir, distribuir, transmitir o comunicar de cualquier manera dicho trabajo, incluyendo el derecho de hacer modificaciones de formato. Además, afirmo que esta cesión no lesiona los derechos de terceros.



14

Dionisio Izquierdo Bravo
Santiago Rincón Arévalo
Metro de Madrid. S.A.

PLAN ENERGÉTICO DE METRO DE MADRID: 12 MEDIDAS DE AHORRO Y EFICIENCIA PARA SER REFERENTE MEDIOAMBIENTALN

Resumen

Metro de Madrid inicia en 2012 la implantación de un ambicioso Plan de Ahorro Energético (PAE) como consecuencia del análisis del consumo energético de la Compañía y la comprobación que la partida presupuestaria destinada a este concepto es una de las más relevantes de la empresa. El PAE se convierte en una de las líneas estratégicas de la Empresa con el objetivo de convertir a Metro de Madrid en un transporte sostenible de referencia en una triple vertiente: económica, social y medioambiental.

En total, se adoptan 12 acciones, que buscan fomentar el ahorro y la eficiencia energética en la explotación de la red, manteniendo la alta calidad del servicio. Dichas medidas se estructuran en cuatro ópticas distintas: tracción, optimizando el consumo y aumentando la regeneración; iluminación para incrementar la eficiencia de los sistemas; distribución, con una gestión eficiente de los suministros en baja tensión; y confort, racionalizando los criterios de climatización y ventilación.

El PAE es innovador por concebir un plan de ahorro energético interviniendo de forma global sobre todos los elementos del sistema ferroviario y creando sinergias entre el material móvil, las instalaciones, la distribución y la regeneración de energía para conseguir mayores beneficios. Además, este proyecto ha sido diseñado, liderado y desarrollado con personal propio de Metro de Madrid.

Por tanto, se ha fomentado la investigación e innovación con recursos propios, pero generando también la evolución del mercado, al exigir a los grupos de interés los mismos criterios.

Los resultados de este ambicioso Plan, cuya implantación finalizó a finales de 2017, tienen una doble vertiente: la reducción directa en el consumo de energía y la consiguiente reducción indirecta en la emisión de gases de efecto invernadero, minimizando el impacto medioambiental derivado de la actividad de Metro de Madrid.

El consumo energético anual de Metro de Madrid en el año 2012 era de 713.218.827 kWh/año y actualmente, tras la ejecución de las medidas implementadas en el PAE el consumo al

finalizar el año 2017 ha sido de 605.311.926 kWh/año, lo que equivale al consumo energético de todos los hogares de una ciudad de tamaño de Málaga o Zaragoza en un año.

Unos beneficios que se prevén incrementar según se consoliden las medidas adoptadas y se realicen todos los ajustes pertinentes durante 2018. En concreto, las 12 acciones son las siguientes:

1. Optimización del Modelo de Propulsión de Material Móvil.
2. Implantación de marchas económicas en conducción automática.
3. Desconexión de subestaciones eléctricas en hora valle.
4. Reducción de la tensión de salida de subestaciones eléctricas.
5. Compensaciones catenaria-vía.
6. Eliminación de imanes de vía.
7. Instalación de subestaciones reversibles.
8. Implantación de alumbrado LED en toda la red.
9. Implantación de alumbrado LED en Material Móvil.
10. Optimización del uso de alimentación eléctrica de emergencia
11. Optimización de la climatización en el Material Móvil.
12. Optimización de la ventilación de túnel.

Asimismo, Metro de Madrid prevé continuar esta línea estratégica, con un segundo Plan de Ahorro Energético, que actualmente está en proceso de diseño.

Abstract

In 2012, Metro de Madrid launched the implementation of an ambitious Energy Saving Plan (ESP) as a result of the analysis of the company energy use and after checking that the budget line of this item is one of the most significant. ESP has become one of the strategic lines which goal is converting Metro de Madrid into a reference sustainable transport in a triple aspect: economic, social and environmental.

Altogether, twelve measures are adopted, which aim at promoting energy saving and efficiency in the network operation, while maintaining the high quality of the service. Such measures are structured in four different perspectives: traction, by optimizing the consumption and increasing power feedback; lighting system, in order to increasing systems efficiency; distribution network, through a more efficient management of supplies of low voltage system; and comfort, by rationalizing conditioning and ventilation criteria.

ESP is innovative for conceiving an energy saving plan by taking action globally on every element of the railway system and creating synergies among rolling stock, facilities, distribution network and power feedback with the purpose of achieving greater benefits. Furthermore, this project has been designed, driven and developed by Metro de Madrid own personnel.

Thus, research and innovation with own resources has been fostered, but also market generation has been bred by requiring its stakeholders the same criteria.

The outcomes of this ambitious plan, which implementation was completed by the end of 2017, have a double dimension; direct reduction of energy consumption and the consequent indirect

decrease of greenhouse gases emission, minimizing the environmental impact from Metro de Madrid operations.

The yearly energy consumption of Metro de Madrid in 2012 was 713.218.827 kWh and, currently, after the implementation of ESP measures, consumption at the end of 2017 went down to 605.311.926 kWh, which is equivalent to the yearly power use of all the households of a city like Malaga or Zaragoza.

Benefits, which are expected to increase as measures taken are consolidated and relevant adjustments are made along 2018. In particular, these twelve measures are as follows:

1. Optimization of Rolling Stock Propulsion Model.
2. Implementation of cost-effective gears in automatic driving mode.
3. Disconnection of power substations during off-peak hours.
4. Reduction of output voltage in power substations,
5. Compensation between catenary and tracks.
6. Removal of track magnets.
7. Installation of reversible power substations.
8. Implementation of LED lighting system around the whole network.
9. Implementation of LED lighting system in Rolling Stock.
10. Optimization of emergency power supply use.
11. Optimization of Rolling Stock conditioning system.
12. Optimization of tunnel ventilation system.

Furthermore, Metro de Madrid foresees to continue this strategic line through a second Energy Saving Plan, which is currently in design process.

Palabras clave

Ahorro energético, eficiencia energética, transporte público sostenible

Área temática

Foro TIC & Sostenibilidad

1. Introducción y estado inicial del PAE

El 94% por ciento del consumo energético de Metro de Madrid se distribuye entre la tracción que se requiere para mover el Material Móvil y la necesidad de las instalaciones existentes en la línea, por lo que cualquier reducción en ambos campos implica inmediatamente un gran ahorro a nivel medioambiental y económico.

En 2012, la Compañía identificó diferentes oportunidades de ahorro mediante un proceso combinado que incluía aspectos teóricos y prácticos aplicados a las características del Material Móvil, las Instalaciones y los equipos existentes en la red de Metro de Madrid.

Los estudios para determinar las medidas a adoptar incluyeron los siguientes aspectos:

- Evaluación de las situaciones actuales y determinación de la línea básica para los estudios.
- Identificación de las áreas de mejora y principios tecnológicos subyacentes.

- Verificación de las capacidades tecnológicas de los sistemas existentes y estado de funcionamiento.
- Realización de estudios de simulación software de diversos sistemas (material móvil, balances energéticos de líneas, etc.).
- Auditorías de instalaciones y equipos embarcados.
- Realización de mediciones reales en aquellos sistemas (unidades de tren, instalaciones) que lo permitan para verificar los resultados teóricos.
- Análisis de los resultados obtenidos de experiencias anteriores y extrapolación de resultados.

Dichos estudios tuvieron asimismo en cuenta aspectos de consumo energético de la compañía e identificación de grandes consumidores, modelo de explotación actual de la red (horario de explotación y servicio de trenes prestado), así como las capacidades técnicas de los equipos actuales y las evoluciones tecnológicas existentes.

En el ámbito de la eficiencia energética en los sistemas ferroviarios existían poca experiencia en 2012. No obstante, ya existía un Plan de Acción de Ahorro y Eficiencia Energética (2011-2020) del IDEA en el que algunas medidas de recuperación de energía se fijaban como obligatorias. ADIF también tenía un Plan Director de Ahorro y Eficiencia Energética desde 2009 y Renfe había diseñado un Plan de Sostenibilidad Estratégica.

Asimismo, se tuvieron en cuenta los escasos estudios existentes en el sector ferroviario sobre consumo energético, eficiencia energética o sistemas de almacenamiento de energía eléctrica.

Tras tener en cuenta tanto los análisis propios, las directrices a nivel estatal marcadas por el Ministerio de Energía, Turismo y Agenda Digital, y los estudios existentes hasta el momento, Metro de Madrid diseñó el Plan de Ahorro Energético (PAE), con un conjunto de 12 medidas.

2. Actuaciones incluidas dentro del PAE

2.1 Optimización del Modelo de Propulsión del Material Móvil

Las curvas de tracción del Material Móvil (curvas características) son diseñadas para definir el régimen cinemático del mismo (espacio, velocidad y aceleración en función del tiempo). La energía consumida asociada a cada curva característica puede ser corregida modificando dicho régimen cinemático, mediante la definición de nuevas curvas de esfuerzo tracción/freno.

Se planteó, por tanto, a través de esta acción, modificar las curvas del Material Móvil para reducir el consumo energético asociado, mediante dos parámetros:

- Reducción del tiempo de potencia constante.
- Modificación de la aceleración.

La implantación de esta medida se realizó en los modelos de trenes 3000, 6000, 7000, 8000 y 9000, que circulan en las líneas 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 10, 11 y 12. Las modificaciones no requirieron inversión de implantación y se llevaron a cabo con recursos propios.

Asimismo, para minimizar el ligero aumento en el tiempo de recorrido que ocasiona esta acción y no influir negativamente en la calidad del servicio prestado a los clientes, se trabajó conjuntamente en los sistemas de señalización, con el objetivo de mejorar la regulación del tráfico y otras medidas a implantar en un futuro, como la apertura automática de puertas.

2.2 Implantación de marchas económicas en conducción automática

Esta medida se centra en el diseño de marchas económicas para la operación eficiente de las líneas en hora valle, basándose en la aplicación de órdenes de deriva, velocidad de remotor y parábolas de freno reducidas.

La complejidad del diseño de marchas parte de que cada posible conducción tiene por atributos un consumo y un tiempo de recorrido, siendo incompatible la optimización de ambas simultáneamente.

La definición de las marchas de conducción se realiza para cada interestación, de forma que utilicen de forma eficiente el tiempo disponible para recorrer la distancia entre dos estaciones en base a los parámetros de regularidad acordados, permitiendo recuperar retrasos o realizar conducciones más lentas según las necesidades de regulación en cada momento.

Se contempló la creación de nuevas formas de conducción que permiten el ahorro energético en base a los tiempos de reserva parciales entre estaciones y al tiempo de recorrido de la línea completa. Para su diseño se utilizan los siguientes datos de partida: estaciones/interestaciones, perfil de vía, curvas, velocidades máximas, velocidades mínimas, perfil de la línea, curvas de tracción de trenes, curvas de frenado, resistencia al avance, parámetros de conducción automática ATO y restricciones de confort.

Las marchas definidas como económicas (fig. 1) llevan un menor consumo energético y optimizan el tiempo de parada de los trenes en estaciones y la mejora de los sistemas de regulación de tráfico, para que los trenes tengan más tiempo para recorrer una interestación con menor consumo energético.

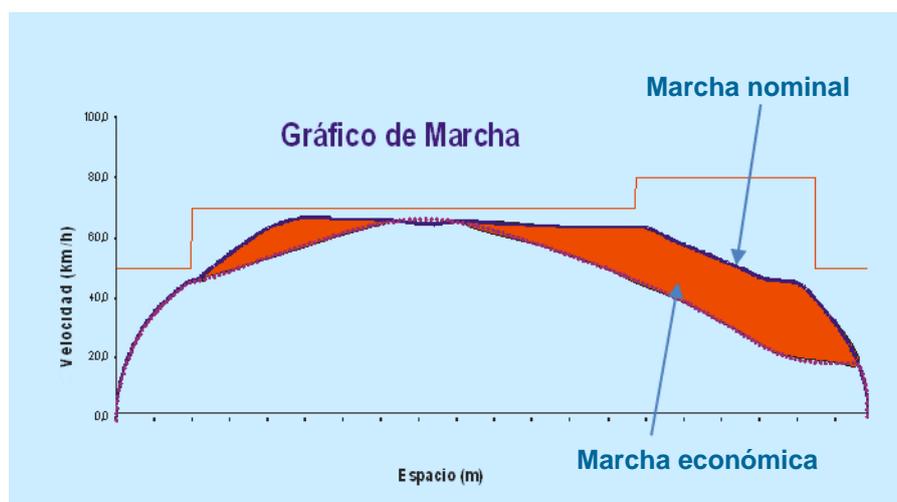


Fig 1. Gráfico diferencial entre marcha económica y marcha actual

2.3 Desconexión de subestaciones eléctricas en hora valle

Las actuaciones incluidas en la presente medida se centran en el estudio de las tablas de trenes y consumos de las líneas para optimizar la tensión en catenaria y favorecer la utilización de la energía regenerada por el material móvil en sus procesos de frenado.

Gracias a la arquitectura de interconexión de la red energética, la medida se basa en reducir el nivel de tensión de catenaria para maximizar la capacidad de devolver energía durante la fase de frenado (freno regenerativo) del material móvil (fig. 2). Todos los trenes de Metro de Madrid (excepto los de la primera serie de trenes 5000) disponen de este freno regenerativo, de tal forma, que durante la fase de frenado los motores actúan como generadores,

devolviendo energía. Esta energía regenerada puede devolverse a la catenaria siempre y cuando haya un consumidor en el mismo tramo que pueda consumir esta energía.

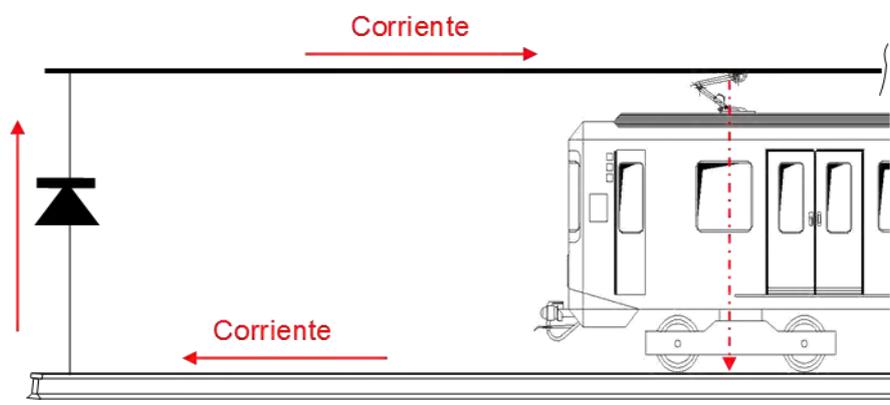


Fig 2. Esquema general de alimentación eléctrica del tren

Actualmente, con la modernización del parque de trenes y el aumento de las necesidades de capacidad de transporte de las líneas, los consumos han ido aumentando. Por ese motivo se pasó de un sistema de alimentación en T a un sistema en paralelo. Así, cada tramo de línea es alimentado simultáneamente por 2 subestaciones, reduciendo las caídas de tensión y manteniendo valores más estables.

Pero esta nueva configuración no favorece la regeneración de energía de frenado puesto que lo más favorable para este aprovechamiento de energía es que la tensión en la línea sea lo más baja posible, lo que no ocurre con el sistema de alimentación en paralelo.

Por tanto, para optimizar el sistema se llegó a una solución de compromiso:

- En hora punta la tensión en catenaria debe ser suficiente para que el sistema soporte la elevada demanda en estas franjas horarias.
- En hora valle, dado que el consumo disminuye significativamente, la tensión en catenaria podría ser más baja, favoreciendo así la recuperación de la energía de frenado.

Según estas premisas, con esta acción se desconectan determinadas subestaciones eléctricas, en función de la tabla de trenes y la demanda de energía. De ese modo se reduce la tensión de catenaria en las proximidades de la subestación desconectada favoreciendo el aprovechamiento de la energía regenerada.

2.4 Reducción de la tensión de salida de subestaciones eléctricas

Esta medida baja al mínimo la tensión de salida de todos los transformadores, colocando la toma de regulación en el valor inferior para ajustar las tensiones de catenaria a los rangos mínimos permitidos y favorecer la regeneración en los procesos de frenado de los trenes.

Los transformadores instalados en las subestaciones están equipados con tomas de regulación. Estas tomas permiten ajustar el valor de tensión de salida al valor deseado. Puesto que muchos de estos transformadores se adquirieron para una explotación inicial en "T" y, por tanto, su tensión de salida se diseñó para garantizar que se pudieran compensar las importantes caídas de tensión que se producen con este tipo de configuración, con el nuevo sistema en paralelo se puede reducir la tensión de salida optimizando el consumo de energía

de tracción a lo requerido y favoreciendo la utilización de la energía regenerada en los procesos de frenado.

2.5 Compensaciones catenaria-vía

La instalación de compensaciones en catenaria y carriles de vía (cross-bonding) consigue un mejor aprovechamiento de la energía regenerada en las frenadas al disminuir la caída de tensión favoreciendo su reutilización por otros trenes. Las compensaciones consisten en poner en las catenarias y carriles de ambas vías, con cables aislados de aluminio, de sección 630 mm. Dichos cables unen tanto las catenarias de ambas vías (compensaciones de positivo) como los carriles de ambas vías (compensaciones entre negativos).

Las principales ventajas de estas compensaciones son las siguientes:

- Consiguen mejores repartos de corriente. Así, en el caso de que haya varios trenes en un mismo sector, estas compensaciones favorecen que haya un reparto más uniforme en la distribución de corriente y evita sobrecargas de la línea.
- Al aumentar la sección efectiva se reducen las pérdidas en la línea (puesto que baja la resistencia efectiva de la línea).
- Se favorece el aprovechamiento de la energía devuelta durante el proceso de frenado del tren, al aumentar el número de caminos eléctricos entre ambas vías. Los trenes tienen la capacidad de devolver energía eléctrica a la red a partir de la energía cinética que habían adquirido previamente. Esta energía cinética acumulada por el tren puede convertirse en energía eléctrica susceptible de ser utilizada en algún otro punto de la red. En esta fase el motor eléctrico de los trenes actúa como generador. Esta energía puede devolverse a la catenaria para que la utilicen otros vehículos. Si en ese instante existen otras unidades traccionando en el mismo sector, la energía devuelta durante el proceso de frenado es aprovechada por estas unidades. En caso contrario se disipa en freno reostático.

Esta medida se centra, por tanto, en optimizar los caminos eléctricos para favorecer la reutilización de la energía de tracción suministrada por la catenaria a las distintas ubicaciones, optimizando así el consumo de energía de tracción a lo mínimo requerido.

2.6 Eliminación de imanes de vía

Se han completado las tareas de estudio y retirada de imanes en la totalidad de la red de Metro de Madrid, habiéndose retirado un total de 377 imanes de la totalidad de la red. Con esta acción se consigue eliminar las zonas neutras en los sectores de tracción de la línea aérea y favorecer el aprovechamiento de la totalidad de la energía de frenado regenerativo del Material Móvil.

Los imanes lo que provocaban era que el tren dejase de traccionar o regenerar energía para pasar de un sector de tracción a otro con garantía y sin provocar arcos eléctricos. Eran necesarios en las configuraciones en "T", en la que los sectores eléctricos sólo se alimentaban por una subestación, pero no se requieren en la actual configuración en paralelo.

La retirada de imanes lleva asociada alguna intervención en los aisladores de sección de la catenaria, elemento que permite un aislamiento eléctrico en la línea aérea (interrumpiendo el paso de corriente) sin provocar discontinuidad mecánica. De ese modo, el deslizamiento mecánico del pantógrafo por estos puntos es continuo. Con esta configuración en paralelo, en vías generales no se requiere frontera eléctrica entre los distintos sectores.

Se trata, por tanto, también de eliminar los aisladores tipo pieza grande que permitían pasar al tren de un sector a otro e instalar solo aisladores de pieza pequeña de puenteo entre las zonas alimentadas por una subestación u otra.

2.7 Instalación de subestaciones reversibles

Se han desarrollado prototipos basados en tecnologías diversas, que permitan aprovechar la energía regenerada por el material móvil en sus procesos de frenado para ser utilizada por otros consumidores internos (escaleras mecánicas, ascensores, sistemas de ventilación, etc) e incluso externos (Metrolinerías), mediante una inyección en la red de distribución interna de 15kv. El objetivo es minimizar el consumo energético actual de Metro de Madrid utilizando las capacidades instaladas y el conocimiento del funcionamiento de la red de explotación.

El prototipo con mejores rendimientos ha estado basado en tecnología de inversores con una solución que convierte las subestaciones de metro de Madrid en reversibles (instalado en Campo de las Naciones) por lo que se ha procedido a la realización de estudios globales de la red de Metro para la identificación de ubicaciones óptimas para la implantación de nuevas celdas, que están en proceso de licitación.

Dentro de las actuaciones de desarrollo de prototipos, en las proximidades de la estación de Sainz de Baranda se puso en funcionamiento la primera Metrolinería de España, que permite la carga de un vehículo eléctrico con la energía procedente del frenado de los trenes que circulan por la red suburbana. Actualmente sigue en su fase de recopilación de datos y con una utilización cada vez mayor de la flota de vehículos eléctricos con conector ChadeMo que circulan por Madrid. Se producen alrededor de 15 cargas diarias entre taxis, furgonetas y vehículos privados.

El objetivo es, por lo tanto, convertir los centros de tracción actuales en reversibles (fig. 3), capaces de convertir la energía devuelta por los trenes en el proceso de frenado, en corriente alterna de nivel de tensión adecuada y devolverla a la red de distribución interna, lo que se consigue instalando un convertidor en paralelo a uno de los rectificadores actuales.

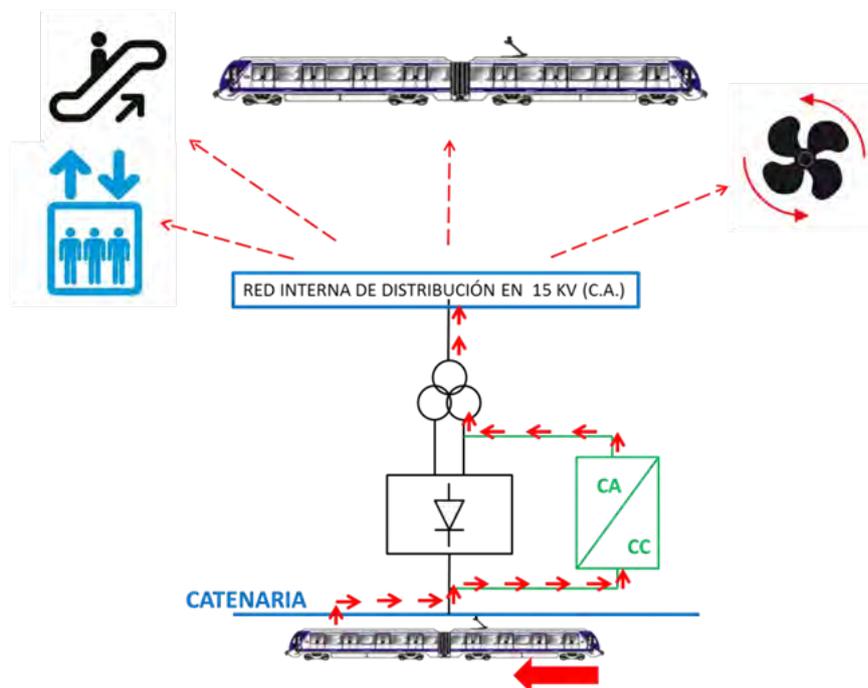


Fig. 3: esquemas de centros de tracción reversibles

2.8 Implantación de alumbrado LED

El alumbrado interior de las estaciones en Metro de Madrid se fundamentaba generalmente en la tecnología fluorescente con distintos tipos de casquillo, tanto T8 como T5, soportada por

luminarias de uno o dos tubos, en montaje lineal a lo largo de andenes, vestíbulos, accesos y cañones de interconexión. La tecnología instalada era esencialmente fluorescente trifósforo, con balasto electrónico, sin cebador, con una temperatura de color de 4.200 K.

Por otro lado, en los recintos que Metro de Madrid denomina Depósitos, Talleres y Cocheras, las instalaciones de alumbrado interior eran de tipo industrial, con diferentes distribuciones de puntos de luz, según el emplazamiento, pudiendo diferenciarse las luminarias instaladas en techos o colgadas y las luminarias situadas en fosos de taller. En el alumbrado exterior, las luminarias instaladas eran las habitualmente utilizadas en alumbrado viario, sobre báculo de 6/8 m de altura y torres de iluminación por proyección de 15/20 m de altura.

La total sustitución a luminarias LED buscó obtener el mejor rendimiento en las instalaciones y el consiguiente uso eficiente de la energía. Adicionalmente, dado que la vida útil de los tubos fluorescentes es de 17.000 horas mientras que el de a la nueva tecnología de iluminación LED es de 50.000 horas, se aumenta también el tiempo de sustitución de los tubos LED reduciendo los residuos generados por Metro de Madrid en dos tercios y la emisión de CO₂ en más de un 50% en lo que a iluminación de instalaciones se refiere.

Además, con la implantación de tecnología LED se mejora el confort térmico en las estaciones, lo que indirectamente genera mayores ahorros, y se optimizan los niveles lumínicos mediante el diseño de las nuevas soluciones.

2.9 Implantación de alumbrado LED en el Material Móvil

Actuación para dotar a los trenes de Metro de Madrid de un sistema de iluminación mediante tecnología LED en recinto de viajeros, cabina y faros frontales que garantiza los valores de luminosidad requeridos para los trenes, reduce el consumo energético y mejora la actual fiabilidad del sistema de alumbrado, a la par que se renueva la instalación eléctrica de alumbrado. Se persigue dotar a los trenes de un sistema de iluminación más fiable y sostenible, reduciendo significativamente el consumo derivado del sistema de iluminación de los trenes.

El circuito de alumbrado del recinto de viajeros y cabina del material móvil estaba compuesto por tubos fluorescentes, alimentados en funcionamiento ordinario por los 220 Vcc, 50Hz o 110 Vcc según serie, que proporcionan los convertidores de la unidad.

Parte de estos tubos están preparados para lucir en caso de falta de alumbrado ordinario por fallo de alimentación del convertidor estático de la unidad. En este caso, este alumbrado de emergencia se alimenta en todos los casos, de manera independiente a 220 Vca 50Hz, mediante convertidores de alumbrado que transforman los 110 Vcc de la línea de alimentación de la batería.

La actuación se aplica sobre las diferentes series de material móvil. En concreto, las series 2000 A, 2000 B, 3000, 5000, 7000, 8000-1^a y 9000. El número de coches intervenidos sobre cada serie son los siguientes:

- Serie 2000 A: 384 coches
- Serie 2000 B: 196 coches
- Serie 3000: 500 coches
- Serie 5000: 198 coches
- Serie 7000: 222 coches
- Serie 8000-1^a: 155 coches
- Serie 9000: 258 coches

Se prevé también intervenir sobre los 234 coches 8000-2^a serie entre 2018 y 2019.

Los beneficios obtenidos son:

- Reducción del consumo de energía
- Mejora de la iluminación del sistema general de alumbrado del tren y de alumbrado de emergencia de la serie.
- Reducción de componentes en el circuito eléctrico de instalación, lo que simplifica su mantenimiento posterior.
- Reducción de componentes que generan residuos peligrosos como los tubos fluorescentes o los balastos que perjudican el medio ambiente. Se reduce el nº de tubos y se eliminan los convertidores de balasto.
- Mejora la fiabilidad del nuevo sistema de alumbrado con tecnología LED con respecto a los originales basados en instalación de tubos fluorescentes.
- Reducción del mantenimiento preventivo requerido para el sistema de alumbrado. El sistema original requiere la revisión de componentes cada año/año y medio (120.000 kms). Con el sistema de alumbrado con tecnología LED este mantenimiento se traslada a los 5 años.
- Reducción del mantenimiento correctivo, al disponer de menos elementos que intervienen en el circuito eléctrico y ser mayor la vida útil estimada para los tubos de LED.
- Mejora de la calidad del servicio y de la imagen.

2.10 Optimización del uso de alimentación eléctrica de emergencia

Con la medida indicada, se propone reformar el sistema de distribución en baja tensión de las estaciones más antiguas para evitar tener consumo permanente de la alimentación exterior de socorro, cuyos costes son más elevados al comprarse la energía en baja tensión.

La energía contratada directamente en baja tensión tiene un precio en torno a un 40% más elevado que la contratada en alta tensión. Por ese motivo es preferible maximizar el consumo en alta tensión a través de nuestro anillo de 15 kV y centros de transformación. Por esto, se está realizando la reforma de los cuadros de baja tensión de las estaciones más antigua para evitar cargas permanentes en la alimentación de socorro y poder así reducir el gasto en energía directamente contratada en baja tensión.

Para llevar a cabo estas tareas, es necesario reformar el Cuadro General de Baja Tensión (CGBT), instalar protecciones e interruptores de conmutación y modificar el cableado entre el CGBT y el cuadro de socorro. Se busca la optimización de consumos en baja tensión en las estaciones haciendo un riguroso estudio de cargas y un ajuste de los contratos de suministro de socorro al objeto de minimizar los costes fijos y direccionar consumos a las acometidas con un menor coste de la energía.

2.11 Optimización de la climatización en material móvil

Esta medida tiene por objetivo optimizar el funcionamiento de los equipos de climatización, minimizando el consumo energético mediante la modificación de las curvas de enfriamiento dentro de unos rangos prefijados en función del periodo invierno/verano, y conforme a la normativa aplicable y parámetros de confort de los viajeros.

En la época de verano se aumenta la temperatura de confort, de forma que, manteniendo un nivel térmico aceptable, se produzca un ahorro de consumo relevante. En la época de invierno, se disminuye la temperatura para conseguir efectos análogos.

Su desarrollo ha pasado por la realización de ensayos con diversas temperaturas de consigna, en diferentes modos de funcionamiento (manual y remoto), con el objetivo de diseñar una única curva optimizada tanto para modo calefacción como aire acondicionado.

La actuación se ha aplicado sobre las diferentes series de material móvil, modificando el software según la nueva curva de regulación e implantando una temporización de 15 minutos para el apagado del equipo cuando el inversor se encuentre en cero.

2.12 Optimización del sistema de ventilación

Se trata de ajustar el funcionamiento del sistema de ventilación para ahorrar energía y mantener según los estándares la calidad del aire y los niveles de confort. Para ello se ha desarrollado el Gestor Inteligente de Ventilación (GIV), que implementa un algoritmo adaptativo multicriterio para obtener la mejor solución de equilibrio entre el máximo confort y el menor coste.

Su programación es dinámica, en base a la estrategia definida, permitiendo una maniobra individualizada por ventilador, sin necesidad de ajustarse a hitos pre-establecidos por estaciones del año. Además, se envía automáticamente desde el GIV las órdenes de funcionamiento al sistema de ventilación, sin pasar por Telecontrol Centralizado de Estaciones (TCE), minimizando fallos de funcionamiento.

Permite la adaptación de la ejecución de órdenes en función de la tipología de pozos y características del equipamiento de sus ventiladores (variadores de frecuencia, auto-ventilación, etc.) e incluye automáticamente restricciones operativas (trabajos nocturnos, tramos fuera de explotación, etc.) y funcionales (ruido, averías de larga duración, etc.).

Entró en funcionamiento a finales de 2017 y se consolidará en el presente año, con un descenso del consumo energético entre un 20 y 40% diario según las primeras pruebas.

3. Conclusiones

Cada una de las medidas adoptadas tienen repercusión sobre dos ámbitos distintos: la tracción y los servicios auxiliares y, en algunos casos, inclusive sobre el consumo de estos dos campos como se refleja a continuación.

MEDIDA	AFECCIÓN SERVICIOS AUXILIARES	AFECCIÓN TRACCIÓN
Optimización del Modelo de propulsión de Material Móvil		X
Implantación marchas económicas en conducción automática		X
Desconexión de subestaciones eléctricas en hora valle		X
Reducción de la tensión de salida de subestaciones eléctricas		X
Compensaciones catenaria-vía		X
Eliminación imanes de vía		X
Instalación de subestaciones reversibles	X	X
Implantación de alumbrado LED en toda la red	X	

Implantación de alumbrado LED en Material Móvil		X
Optimización de uso de alimentación eléctrica de emergencia	X	
Optimización de la climatización en el Material Móvil		X
Optimización de la ventilación de túnel	X	

Con el grado de implantación actual de las doce medidas identificadas inicialmente, el consumo energético en alta tensión ha descendido en los últimos años, pasando de los 714,4 GWh en 2012 a tan solo 594 GWh en 2017.

AÑOS	SERVICIOS AUXILIARES	TRACCIÓN	TOTAL
2012	246.510.432	467.966.388	714.476.820
2013	217.266.544	384.288.221	601.554.765
2014	214.898.506	361.473.546	576.372.052
2015	212.403.085	363.930.035	576.333.120
2016	207.106.647	376.422.113	583.530.776
2017	194.063.817	400.023.428	594.087.245
dif 2012/2017	52.446.615	67.942.960	120.389.575

En los primeros años de funcionamiento, el PAE ha conseguido disminuir en 120,389 GWh el uso de energía con estas medidas. Esta tendencia crecerá con la consolidación de medidas ya implantadas y el desarrollo del resto que se han finalizado en el año 2017. Por ejemplo, se estima una reducción adicional de 13% con el ahorro energético de la tecnología LED y GIV (20.312.799 kWh/año y 5.687.060 kWh/año).

En el caso de la tracción, el dato global indica un incremento en los últimos tiempos, pero por el aumento de trenes a disposición y el incremento de viajeros. Si se compara el ratio de kWh/coche*km, la bajada también es significativa.

El ratio de consumo de tracción de la media de los grandes metros del mundo está por encima de 2,6 kWh/coche*km, en el caso de Metro de Madrid, y gracias a la eficacia de las medidas aplicadas, este ratio ha descendido hasta valores inferiores a los 2 kWh/coche*km en muchos periodos del año. En la siguiente gráfica se muestra la evolución de los ratios de consumo en tracción.

Ratios de consumos de tracción (kWh/c.km)

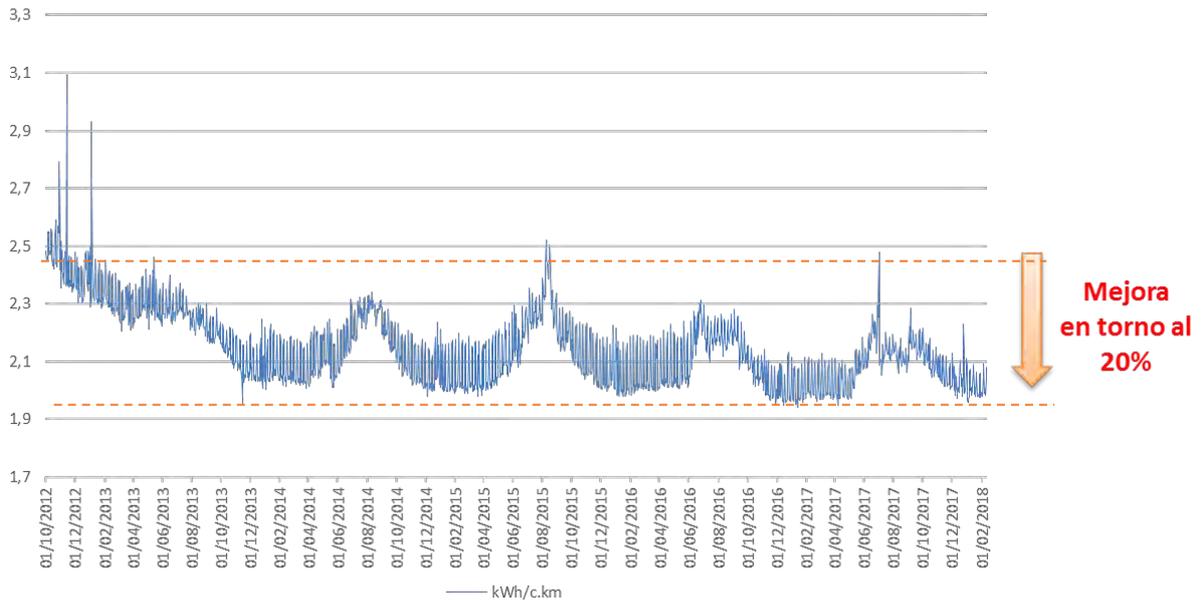


Fig. 4: evolución de los ratios de consumos de tracción

La evolución del consumo de sistemas auxiliares se visualiza en la siguiente gráfica, con un descenso claro sostenido al no depender tanto como la tracción de la demanda de viajeros.

Evolución consumo SSAA Metro (sin ML1) 2011-2017

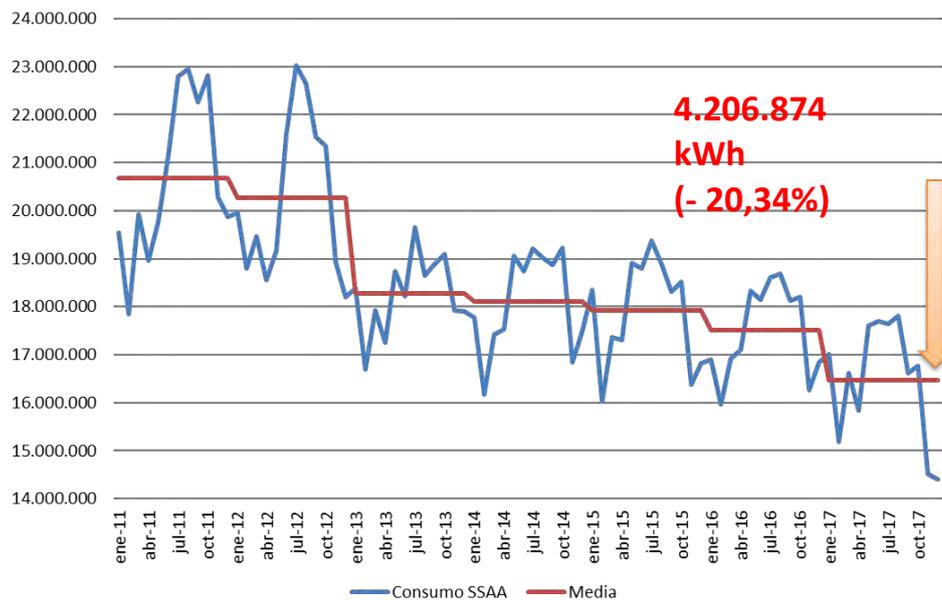


Fig. 5: evolución de los consumos de Servicios Auxiliares

En definitiva, el compromiso de Metro de Madrid en este ámbito es muy contundente y tras estos magníficos resultados ha iniciado el diseño de un segundo PAE.

4. Bibliografía

- UNE-EN 50119: 2010 Aplicaciones ferroviarias. Instalaciones fijas. Líneas aéreas de contacto para tracción eléctrica.
- UNE-EN 20324 Grados de protección proporcionados por las envolventes (Código IP). (CEI 529:1989).
- UNE-EN 50121 Aplicaciones ferroviarias. Compatibilidad electromagnética.
- UNE-EN 50122 Aplicaciones ferroviarias. Instalaciones fijas. Seguridad eléctrica, puesta a tierra y circuito de retorno.
- UNE-EN 50124 Aplicaciones ferroviarias. Coordinación de aislamiento.
- UNE-EN 50125 Aplicaciones ferroviarias. Condiciones ambientales para el equipo.
- UNE-EN 12464 Iluminación de lugares de trabajo
- RITE (Reglamento de Instalaciones Térmicas de los Edificios)



Miguel Magaña Suárez
AUSSA
Adolfo Ballesteros de Juan
*Escuela Técnica Superior de
Ingeniería, Universidad de Sevilla,
España*

ESTIMACIÓN EN TIEMPO REAL DE LA OCUPACIÓN DE LA ZONA REGULADA DE SEVILLA

Resumen

En este artículo se presenta un método para predecir la ocupación de la zona de estacionamiento regulado de Sevilla en base a una solución implantada en enero de 2017. El usuario recibe a través de una APP en su teléfono móvil una estimación del número de plazas libres disponibles en cada calle de la ciudad. La estimación se realiza prediciendo el número de plazas ocupadas en la calle, deduciendo por lo tanto las que quedan libres.

Abstract

This article presents a method for predicting the occupation of the parking regulated area of Seville based on a solution implemented in January 2017. The user receives through an APP on his mobile phone an estimate of the number of free spaces available on each street of the regulated area in the city. The estimation is made predicting the amount of the occupied spaces of the street, deducting consequently the resulting free spaces.

Palabras clave: Zona regulada; aprendizaje automático; pago por móvil; aparcamiento; smart cities; movilidad sostenible.

Área temática: Actuaciones sostenibles del espacio urbano: movilidad, Smart cities.

Introducción

La predicción de la ocupación de la zona de estacionamiento de una ciudad es un aspecto clave para gestionar de manera más eficiente la movilidad urbana. El flujo de vehículos que circula buscando aparcamiento entorpece el tráfico global, generando ruido y unas emisiones mayores de CO₂ al aire. Una mejor regulación del tráfico provocaría cambios positivos en la situación medioambiental de la ciudad.

Cabe destacar que todo viaje en automóvil finaliza en un estacionamiento.

La razón principal que motivó la realización de este proyecto fue desarrollar un método predictivo robusto y cuya implantación en cualquier otra ciudad o escenario se pudiese realizar de forma automática, eliminando en la mayor medida posible el factor humano. Las calles de Sevilla están ocupadas tanto por residentes como por vehículos de rotación, pudiendo estos adquirir tique tanto en los parquímetros como mediante pago móvil. El aumento continuo del

volumen de tiques vendidos a través de la APP hace que sea necesario definir el método dando importancia a este nuevo grupo de usuarios.

1.1. Estado del arte

Una de las soluciones desarrollada en algunas ciudades para abordar este problema consiste en la implantación de un sistema de sensores que transmite en tiempo real la situación de las distintas plazas. La disponibilidad de plazas se muestra al usuario en paneles situados en las calles. La información que recibe el usuario es instantánea y sin error aparente, permitiendo reducir enormemente el tiempo de estacionamiento. Como inconveniente se encuentra el alto coste de la sensorización del sistema y los costes derivados del mantenimiento. Este sistema fue implantado en las ciudades de Málaga y Santander, aunque actualmente no se encuentra en funcionamiento (Europa Press, 2015).

Hoy en día se recoge de forma automática una gran cantidad de datos proveniente tanto de parquímetros, como de APP móviles y de los controladores. Sacar partido a este volumen de datos permitiría caracterizar el comportamiento de los usuarios sin incurrir en la implantación de sensores y otros sistemas de hardware más costosos y con una mayor exigencia de mantenimiento.

Actualmente, adquirir un ordenador con una alta capacidad computacional capaz de tratar con millones de datos resulta bastante económico. Es por ello que son ya muchas las empresas que se están aventurando en este campo de aplicación. Métodos predictivos como el Machine Learning son los más empleados en el sector. Los recientes avances tecnológicos están permitiendo que la búsqueda de patrones en el comportamiento de los usuarios sea cada vez más dinámica y asequible.

En un trabajo previo realizado en 2016 se elaboró una metodología para predecir la ocupación de la zona regulada de la ciudad de Sevilla, publicando un sencillo código de colores en el móvil del usuario (Timermans, 2016).

El método, actualmente en funcionamiento, predice el volumen de plazas libres en las distintas áreas que constituyen la ciudad. Se entiende por área a un conjunto de tramos (fragmentos de calles). El método relaciona las plazas libres de cada área con el número de tiques expedidos en los parquímetros próximos y con unos índices predefinidos para tratar las plazas ocupadas por vehículos en situación de indisciplina y por los residentes.

Se emplearon técnicas de Machine Learning para predecir las plazas libres a partir del volumen de datos disponible. Concretamente, se diseñaron dos Redes Neuronales Artificiales (RNA). La primera de ellas se encarga de predecir el volumen de tiques expedido en un parquímetro en los próximos 30 minutos. La segunda RNA utiliza como entradas la predicción de tiques calculada en la RNA 1, los índices relativos a los residentes y la indisciplina calculados con los datos históricos, la fecha y la hora para obtener el número de plazas libres resultante.

$$\text{Plazas Libres} = \text{RNA}_2(\text{Fecha}, \text{Hora}, \text{Tiques expedidos}, \text{Residente}, \text{Indisciplina}) \quad (1)$$

Datos provenientes de parquímetros

Esta fuente de datos proviene de los tiques emitidos, en tiempo real, en los parquímetros situados en la vía pública. De ellos se conoce el tipo de tique adquirido por el usuario (rotación, residente,...), el intervalo de tiempo reservado, la hora del abono y el parquímetro desde donde se realiza la operación y por consiguiente la zona aproximada de estacionamiento.

Datos obtenidos de los conteos

De las inspecciones llevadas a cabo por los empleados-controladores, en relación a los vehículos que estacionan incumpliendo las ordenanzas, se recoge la situación de las distintas plazas de la zona regulada. Este proceso de inspección se lleva a cabo sistemáticamente recorriendo las zonas de estacionamiento, verificando el estado de cada plaza. Las distintas situaciones que pueden darse se listan a continuación:

- i. Tique válido
- ii. Tique pasado de hora, vehículo que se denuncia
- iii. Sin tique, vehículo que se denuncia
- iv. Residentes, P.M.R. y vehículos eléctricos
- v. Plazas no disponibles (por ejemplo obras o carga y descarga). También se incluyen en este grupo las plazas ocupadas por vehículos denunciados con anterioridad.
- vi. Plazas libres

Los datos disponibles son incompletos, no se dispone de información exhaustiva y completa de todos los tramos o calles de manera continua en tiempo real. La información de los conteos se obtiene de forma discreta para determinados intervalos de tiempo, asociados a los periodos temporales en los que se realizan las inspecciones.

2. Metodología

Desde 2016, año en el que se diseñó el primer método predictivo, ha cambiado considerablemente la forma en la que los controladores realizan su trabajo. Este cambio ha provocado un aumento en la calidad y cantidad de datos disponibles permitiendo esta mejora del método.

Se presenta en este apartado una metodología más avanzada para predecir la situación de la zona regulada en un determinado intervalo temporal.

Reducción de las áreas a tramos

Los tramos son las unidades mínimas que componen la zona regulada de Sevilla, siendo tanto calles completas como fragmentos de ellas. Las áreas son un conjunto de tramos diseñado de forma manual. En el método empleado hasta ahora se predice el número de plazas libres que habrá en cada área. Con la intención de eliminar en la mayor medida posible el factor humano se va a reducir el tamaño de las áreas, definiendo un área por cada tramo.

Sin embargo, cada tramo se verá influenciado por los tramos vecinos creando de esta forma un nuevo concepto de área mucho más amplio. La elección de los tramos que se afectan entre si se realiza de forma automática por las redes neuronales.

Trabajar con cada grupo de usuarios de forma independiente

En la zona regulada de Sevilla estacionan distintos grupos de usuarios:

- Residentes.
- Usuarios con tique válido.
- Indisciplina (Usuarios sin tique válido).

Se ha detectado que el comportamiento de cada grupo de usuarios se ve afectado por distintas causas, no influyen los mismos factores en la distribución de los residentes que en la de los vehículos que estacionan con tique no válido. Por este motivo se ha decidido predecir el número de plazas que ocupará cada uno de forma independiente y a raíz de ellas deducir las que quedan libres. Transformando la Ecuación 1 en el sumatorio mostrado en la Figura 2.2.1.

2.1. Nuevos datos empleados

Como se ha comentado previamente, el porcentaje de tiques expedidos vía APP es un factor que está en continuo crecimiento y que no puede seguir siendo despreciado. Actualmente la empresa operadora cuenta con una aplicación para smartphone propia, a través de la cual se pueden adquirir tiques para estacionar en la zona regulada. Si el usuario lo desea puede introducir en la APP la ubicación del vehículo y automáticamente expedir el tique correspondiente. Sin embargo, para obtener un tique virtual tan solo es necesario indicar la zona donde se desea aparcar (Verde, Azul o Mar), sin llegar a especificar expresamente la ubicación donde se sitúa el vehículo.

Esta metodología dificulta la predicción de la ubicación de este tipo de usuario, a continuación se presenta la solución implantada para abordar este problema.

2.2. Modelado de las funciones predictivas

Para deducir el número de plazas libres se tratan por separado cada uno de los grupos de usuarios que hacen uso de la zona de estacionamiento:

$$\sum \left[\text{RESIDENTES} \quad \text{INDISCIPLINA} \quad \text{TIQUE VÁLIDO} \quad \text{LIBRES} \right] = 100 \%$$

Figura 2.2.1. Grupos de usuarios que estacionan en la zona regulada.

De la suma de los resultados obtenidos tras predecir el comportamiento de dichos grupos de usuarios se obtiene el número de plazas libres restantes (Figura 2.2.1.).

Dentro de las distintas técnicas que componen el Machine Learning se ha elegido seguir trabajando con RNAs. Se usan distintas Redes Neuronales Artificiales para cada grupo de usuarios, todas ellas tienen como entradas comunes la fecha y la hora. Para entrenar las RNAs se emplean como salidas los datos de los conteos realizados en 2017. Dichos

conteos son filtrados para eliminar errores o incongruencias en los mismos.

2.2.1. Residentes

Los residentes son un grupo de usuarios que tienen un patrón de estacionamiento bastante regular. Para predecir el número de residentes estacionados en el tramo se emplea el acumulado de tiques de residentes diarios y semanales expedidos hasta la fecha y sus pautas históricas de estacionamiento.

$$\text{Plazas Ocupadas Residente} = \text{RNA}_R(\text{Fecha}, \text{Hora}, \text{Tiques expedidos Residente}) \quad (2)$$

2.2.2. Usuarios con tique

Se predice de forma conjunta la ocupación del tramo por parte de usuarios con tique en vigor de parquímetro y virtual (de APP).

Usuarios con tiques adquiridos en los parquímetros

Se reutilizará el método existente para predecir el volumen de tiques expedido en los parquímetros. Al estar los parquímetros prácticamente diseñados para cubrir uno o dos tramos, la relación entre los tiques expedidos y las plazas ocupadas se puede calcular de forma sencilla empleando una RNA.

Para saber en qué tramo estacionan normalmente los usuarios que compran un tique en un determinado parquímetro se va a estimar una matriz de pesos dinámica relacionando las matrículas registradas por los controladores en los conteos con las de los tiques expedidos.

Usuarios con tique vía APP

La información que se conoce de los mismos es la relativa al volumen de tiques expedidos por cada zona tarifaria (Azul, Mar o Verde), desconociendo a priori la ubicación del vehículo del usuario que ha adquirido el tique.

Como solución se han cruzado las matrículas de los tiques con las que registran los controladores durante los conteos. De esta forma se conoce la ubicación de cierto porcentaje de usuarios, ubicación de la que se pueden extraer ciertos patrones de comportamiento extrapolables al total de usuarios de la APP.

$$\text{Plazas Con Tique} = \text{RNA}_T(\text{Fecha}, \text{Hora}, \text{Tiques expedidos APP}, \text{Tiques expedidos PQ}) \quad (3)$$

2.2.3. Indisciplina

Para predecir la indisciplina se usaran como entradas en la RNA el acumulado de denuncias impuestas el mismo día hasta la hora de la predicción. Uno de los problemas de la indisciplina es que no se conoce el sobre-tiempo del vehículo estacionado posteriormente a la denuncia. Las plazas ocupadas por vehículos ya denunciados se declaran en situación de No Disponibles.

$$\text{Plazas Ocupadas Indiciplina} = \text{RNA}_I(\text{Fecha}, \text{Hora}, \text{Denuncias realizadas}) \quad (4)$$

2.2.4. Plazas no disponibles

Las plazas que están destinadas a carga y descarga y las ocupadas por obras se eliminan de forma automática del total de plazas disponibles del tramo.

2.3. Clustering

Agrupando todos los datos relativos a cada tramo se procede a realizar un proceso de Clustering en busca de patrones. El Clustering es un proceso en el que se emplean redes neuronales no supervisadas para agrupar datos según similitudes.

De esta forma se pueden detectar tanto picos de comportamiento irregular en los tramos como completar los datos incompletos de los tramos que lo requieran con aquellos correspondientes a tramos de su mismo clúster. Cuando se añada un tramo nuevo a la zona regulada o se modifiquen los existentes su comportamiento se puede asimilar al de otro grupo hasta que se cuente con datos suficientes para que sea predicho por sí mismo.

3. Resultados

Una RNA es un modelo computacional que sigue un comportamiento análogo al de los axones de las neuronas del cerebro. Estas redes son básicamente matrices de pesos que transforman unas determinadas entradas en salidas. Para establecer estos pesos se entrenan las redes introduciéndoles tanto las salidas como las entradas. Los datos de diseño empleados se dividen en tres grupos (Training, Validation y Test data). El porcentaje suele ser 75%, 15% y 15% respectivamente. Tanto el "Training data" como el "Validation data" se usa para entrenar la red mientras que el "Test data" se reserva para comprobar el funcionamiento de la misma.

El proyecto ha seguido una línea de trabajo consistente en dos fases principales. Inicialmente se realizaron pruebas modificando tan solo la definición de las áreas sobre el modelo ya diseñado en 2016. La idea es verificar que la decisión tomada es viable y comprobar si se dispone de datos suficientes para entrenar las redes neuronales. Posteriormente, tras el filtrado y la manipulación de los datos, se diseñaron cada una de las redes neuronales establecidas para predecir el comportamiento de los distintos grupos de usuarios.

En la Tabla 3.1. se muestra una comparativa entre los coeficientes de regresión y el error cometido en 2016 y los resultados obtenidos en 2018 asumiendo estas nuevas modificaciones. Se ha elegido un área del barrio del Arenal compuesta por cuatro tramos.

		Resultados 2016	Resultados 2018
Coeficiente correlación			0,751
		0,629	0,302
			0,466
			0,426
Error Medio	Cuadrático	0,0172	0,00117
			0,00235
			0,00283
			0,00269

Tabla 3.1. Comparativa de los resultados obtenidos en 2016 y 2018. Se muestran los coeficientes de correlación obtenidos entre la predicción de la RNA y los resultados esperados y el error cuadrático medio.

Se puede observar que aunque el coeficiente de regresión empeore, el error cometido disminuye considerablemente. Por lo tanto, se puede asumir que se dispone de datos suficiente y que variando el diseño interno de las RNAs para mejorar el coeficiente de correlación los resultados serían favorables. Se procede a diseñar y entrenar las RNAs para predecir el comportamiento de cada uno de los grupos de usuarios.

En las Figuras 3.1. y 3.2. se muestran como ejemplo los coeficientes de regresión y el error cuadrático medio obtenido en un tramo del barrio de la Macarena de Sevilla. De ellos se puede extraer que el error medio cometido en la predicción es del **16%** y que el coeficiente de regresión de los datos de testeo es de **0,8**.

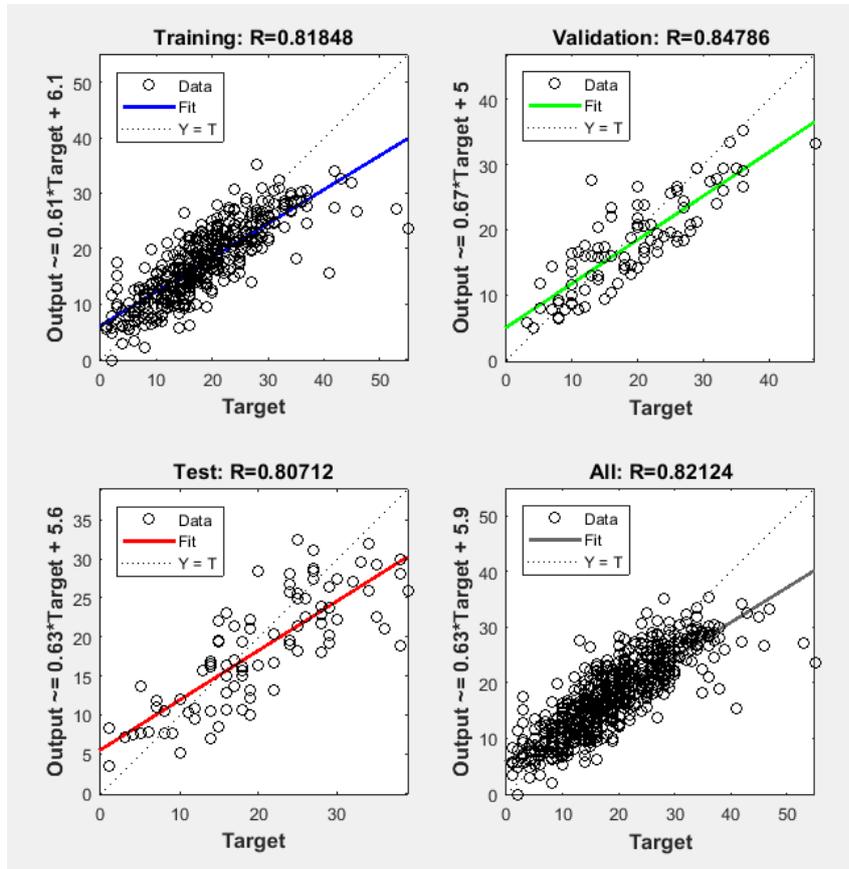


Figura 3.1. Coeficientes de correlación de la RNA_T . Se muestran los valores para cada uno de los grupos en los que se dividen los datos de entrenamiento.

4. Conclusiones

Como resultado se dispone de un modelo matemático que prescinde en su entrenamiento del factor humano a la hora de predecir la ocupación, exceptuando lógicamente la toma de datos realizada por los controladores. El método es robusto y adaptable a nuevas poblaciones sin necesidad de conocer con antelación al detalle el comportamiento de la misma. Además, mediante el Clustering se pueden solucionar errores puntuales o incorporar a la red nuevos tramos de los que no se dispone de datos a priori.

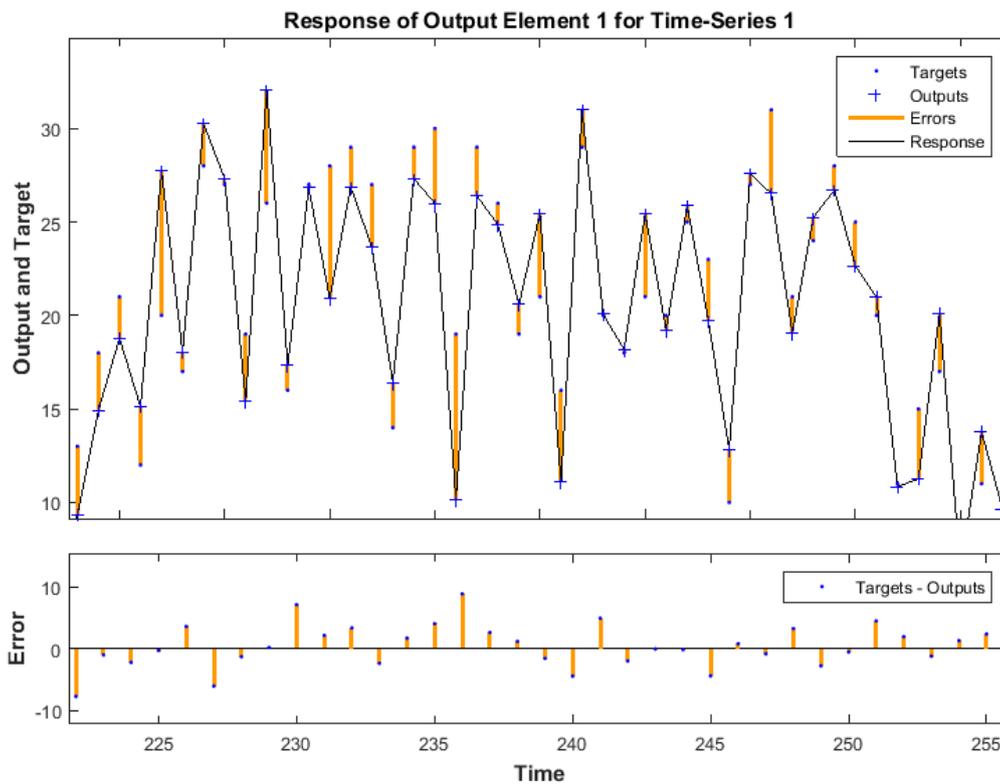
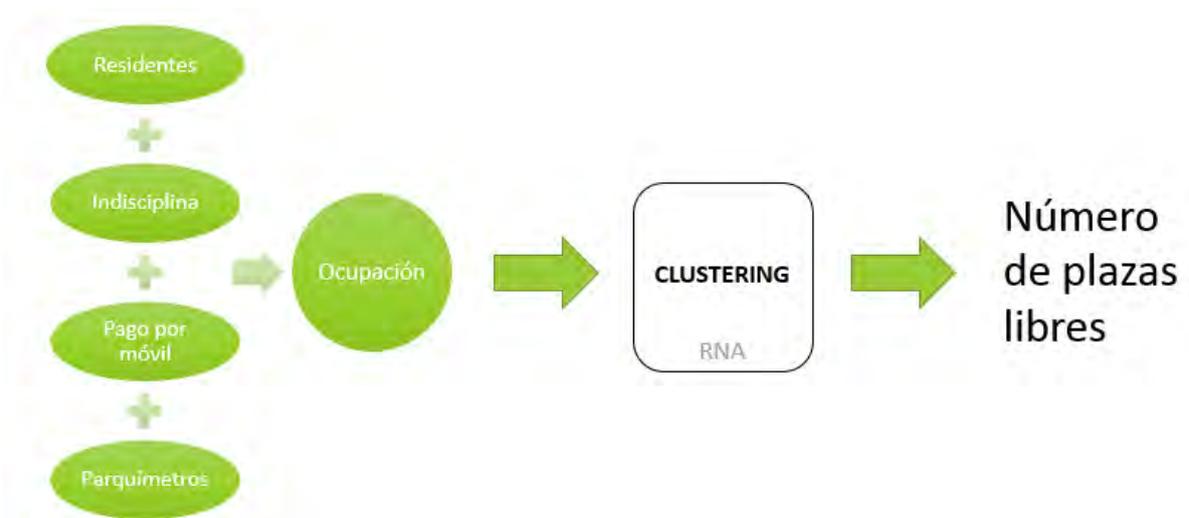


Figura 3.2. Comparativa entre la predicción y los resultados contrastados y esperados en la ocupación de plazas por usuarios con tique válido.



Gráfica 4.1. Nuevo modelo predictivo. Proceso por el que se transforman las entradas iniciales obtenidas de forma empírica en la predicción de las plazas libres que habrá en el próximo intervalo temporal.

5. Referencias

Coursera Inc. (2015). *Coursera*. Obtenido de Machine Learning: <https://www.coursera.org/learn/machine-learning/home/welcome>

EuropaPress. (2015). *Europa Press*. Obtenido de <http://www.europapress.es/andalucia/malaga-00356/noticia-malaga-implanta-sistema-ayudar-buscar-aparcamiento-calle-20150326145053.html>

The MathWorks, Inc. (2015). *Matlab Documentation*. Obtenido de <http://es.mathworks.com/help/matlab/>

Timermand, M. N. (2016). Predicción de las plazas libres disponibles en la zona regulada de Sevilla empleando redes neuronales. CIT 2016.

Datos de contacto

Miguel Magaña Suárez

Tlf.: 954.219.051

mmagana@aussa.com

Cesión de derechos

Por la presente, y como autor del trabajo mencionado arriba, cedo al Palacio de Ferias y Congresos de Málaga una licencia no-exclusiva irrevocable para imprimir, reproducir, distribuir, transmitir o comunicar de cualquier manera dicho trabajo, incluyendo el derecho de hacer modificaciones de formato. Además, afirmo que esta cesión no lesiona los derechos de terceros.



Miguel Picornell
Ricardo Herranz
Manuel Álvarez
Iris Galloso
Kineo Mobility Analytics, S.L.

FUSIÓN DE DATOS PARA LA PLANIFICACIÓN DE SERVICIOS URBANOS SOSTENIBLES – CASOS DE USO EN TRANSPORTE, MEDIO AMBIENTE Y TURISMO

Resumen

La planificación y gestión de ciudades sostenibles requiere entender el comportamiento de la población: la planificación y operación del transporte necesita información precisa, fiable y actualizada sobre la demanda de viajes; la definición de estrategias efectivas que mitiguen la exposición a la contaminación requiere conocer la distribución espacio-temporal de la población a lo largo del día; el diseño de una oferta turística sostenible necesita conocer los patrones de actividad de los turistas. Las fuentes de datos tradicionales, basadas fundamentalmente en encuestas, proporcionan información muy valiosa, pero no están exentas de inconvenientes. En general, las encuestas resultan caras y lentas de realizar, lo que limita el tamaño de la muestra y su frecuencia de actualización. Además, están sujetas a respuestas incorrectas e imprecisas y dependen de la disposición a responder de los entrevistados.

La posibilidad de recoger datos geolocalizados procedentes de dispositivos móviles personales, de manera dinámica y a un coste inferior al de los métodos tradicionales, abre nuevas oportunidades para superar estos problemas. En particular, los datos procedentes de las redes de telefonía móvil permiten obtener un tamaño de muestra uno o dos órdenes de magnitud superior al de las encuestas convencionales. Asimismo, el alto nivel de penetración de los servicios móviles en prácticamente todos los estratos de la sociedad garantiza muestras muy bien distribuidas. La elevada granularidad temporal de los datos permite determinar con detalle la localización del móvil a lo largo del día y su resolución espacial resulta en general adecuada para estudios a escala urbana y metropolitana.

La presente comunicación aborda el análisis de registros anonimizados de telefonía móvil y su fusión con otras fuentes de datos para proporcionar información sobre actividad y movilidad de la población. Se discute la necesidad de enriquecer la información obtenida mediante telefonía móvil con diversas fuentes de datos, se expone la metodología y se presentan tres casos de uso: el **estudio de la movilidad general y en transporte público en Málaga** mediante la fusión de datos de telefonía móvil y datos de tarjeta inteligente de transporte; el estudio de la **exposición a la contaminación en Madrid** a partir de mapas dinámicos de población y de un modelo de dispersión de contaminantes; y el **análisis de los visitantes al Parque Nacional de la Sierra de Guadarrama** a partir de datos de telefonía móvil y datos de aforo.

Abstract

The planning and management of sustainable cities requires understanding the behavioural patterns of the population: transport planning and operation requires accurate, reliable and updated travel demand information; the definition of effective strategies to mitigate the exposure to air pollutants needs information on the spatio-temporal distribution of the population along the day; tourist's activity and mobility patterns are essential to design a sustainable touristic offer. Traditional data collection methods, such as household travel surveys, provide rich travel and demographic data, but they also suffer from shortcomings: they depend on users' willingness to answer, people may provide incorrect or imprecise answers, and they are expensive and require months to complete, which limits the size of the sample and the frequency with which information is updated.

New digital data sources make it possible to complement and/or replace traditional travel surveys, overcoming some of their main limitations. In particular, mobile phone records can give access to a sample that is usually at least one order of magnitude higher than the one provided by traditional sources, and that is also well distributed across the different socioeconomic segments, given the high penetration of mobile phone services. Additionally, the high temporal granularity of mobile phone data allows us to determine in detail the location of the device along the day and their spatial resolution is in general suitable to study population's behaviour at urban and metropolitan scale.

This contribution focuses on the analysis of anonymised mobile phone data and their fusion with other data sources to provide information on population's activity and mobility. We discuss the need to enrich the information obtained from mobile telephone data with different data sources and we described the methodology followed in three use cases: the **study of mobility, including public transport mobility, in the city of Málaga** using mobile phone data and intelligent transport card data; the study of **population exposure to air pollutants in the city of Madrid** using dynamic population maps and an air pollutants dispersion model; and the characterisation of the visitors to the **Parque Nacional de la Sierra de Guadarrama** using mobile phone data and people counts.

Palabras clave: *fusión de datos; datos de telefonía móvil; patrones de movilidad y actividad; transporte; calidad del aire; turismo*

Área temática: *actuaciones sostenibles del espacio urbano.*

1. Introducción

El conocimiento de los patrones de conducta de la población es esencial para el diseño de políticas sostenibles. Esta información ha sido tradicionalmente obtenida a través de encuestas. Las encuestas proporcionan información muy completa, pero adolecen de algunas limitaciones. La realización de encuestas es costosa en términos de tiempo y dinero, lo que conlleva que el tamaño de la muestra sea reducido y en muchos casos la información esté desactualizada. Además, la dependencia de la disponibilidad a contestar del entrevistado y las imprecisiones de las respuestas pueden producir muestras sesgadas (por ejemplo, capturando sólo usuarios con mayor disponibilidad de

tiempo) o información incompleta (muchas veces los entrevistados olvidan reportar algunas actividades, estiman de manera muy aproximada tiempos de viaje, etc.).

La gran cantidad de datos producidos por el uso generalizado de dispositivos móviles geolocalizados permite obtener información de forma continua sobre la movilidad y actividad de las personas, así como a observar, en tiempo real, su reacción a medidas o fenómenos puntuales. A lo largo de la última década, distintos estudios han abordado el análisis de la movilidad a partir de las trazas geolocalizadas procedentes de teléfonos móviles [1,2], redes sociales de Internet [3], registros de uso de tarjetas de crédito [4] o tarjetas inteligentes de transporte [5], entre otros ejemplos. Particularmente interesantes resultan los datos procedentes de las redes de telefonía móvil, gracias al tamaño muestral que proporcionan y a su elevada resolución temporal. Diferentes ejercicios de validación llevados a cabo en los últimos años han demostrado que los datos de telefonía móvil, adecuadamente tratados, permiten extraer matrices origen-destino y otras estadísticas de viajes coherentes con las obtenidas mediante encuestas [6]. Por otro lado, los datos de telefonía móvil presentan también algunas limitaciones. En particular, la resolución espacial de los registros de telefonía, en general localizados al nivel de las celdas de la red, hace que no siempre sea posible la identificación del modo de transporte utilizado y la ruta elegida en los desplazamientos identificados, especialmente en el caso de desplazamientos de corta distancia en entornos urbanos. Una alternativa para superar esta limitación es el uso de los datos procedentes de las tarjetas inteligentes de transporte público para extraer las matrices de viajes en transporte público [7,8,9,10].

En la presente comunicación se discuten tres ejemplos de casos prácticos donde los datos de telefonía móvil han sido fusionados con distintas fuentes de datos para obtener información sobre la movilidad y actividad de la población y se han empleado en distintas aplicaciones relacionadas con la planificación urbana: transporte y movilidad, medioambiente y turismo. En la Sección 2 se detallan el tipo de datos empleados y se describen y discuten los tres casos de uso. En la Sección 3 se presentan las conclusiones extraídas de los casos de uso sobre el potencial del uso de datos provenientes de telefonía móvil para la planificación y gestión de ciudades sostenibles.

2. Datos y descripción de casos de uso

Fuentes de datos

A continuación se describen las características de los distintos datos empleados en los casos de uso. Algunas fuentes de datos, como los datos de telefonía móvil y los datos del Padrón Municipal de Habitantes, son comunes a todos los casos, mientras que otras fuentes son específicas para cada caso.

A) Datos de telefonía móvil. Se han empleado datos de registros de telefonía móvil anonimizados proporcionados por Orange España. Los datos incluyen los registros generados cada vez que se produce un evento de interacción de un terminal móvil con la red, ya sea al efectuar o recibir una llamada, enviar un mensaje de texto o iniciar una sesión de datos. Los datos incluyen también determinados eventos pasivos, tales como cambios de áreas de cobertura. Cada registro contiene, entre otros, los siguientes campos:

- Id anonimizado del usuario

- Hora del evento
- Antena a la que se conecta el dispositivo en el momento del evento
- Tipo de evento: llamada, sms, datos.

La muestra proporcionada corresponde aproximadamente a un 27% de la población española. Para la mayoría de los usuarios la granularidad temporal es de entre 20 y 30 minutos, mientras que la granularidad espacial depende de la densidad de celdas de telefonía, variando desde entre unas decenas o cientos de metros en entornos urbanos hasta varios kilómetros en zonas rurales con menor densidad de población.

B) Datos del Padrón Municipal de Habitantes. Los datos de número de habitantes a nivel sección censal se utilizan como marco muestral, para expandir la muestra obtenida con los datos de telefonía al total de la población.

C) Datos de tarjeta inteligente de transporte. Estos datos fueron utilizados para el estudio de la movilidad en Málaga. Los datos de la tarjeta de transporte incluyen la siguiente información:

- Id anonimizado de la tarjeta.
- Información sobre la hora de validación de la tarjeta.
- Localización de la validación, que puede corresponder a la localización de la estación o a la posición del vehículo en el que se produjo la validación. En este último caso, la localización se obtiene a través del SAE¹
- Tipo de validación. Esta puede ser entrada o salida. Para los autobuses sólo se dispone de la información de entrada.

Otra información sobre la red de transporte público, no asociada a la tarjeta de transporte, pero relevante para el estudio, incluye datos de la red y de la oferta de servicios (paradas, incluyendo posición, y líneas existentes), datos del SAE, y valores totales de demanda (incluyendo tanto a los viajeros usuarios de la tarjeta de transporte como a los que utilizan otros títulos de transporte).

D) Datos de contaminantes del aire en Madrid. Se ha utilizado la información de concentración de NOx medida en las distintas estaciones del Ayuntamiento de Madrid, que se ha empleado para obtener los niveles de contaminantes en cada zona de la ciudad.

E) Conteos de visitantes al Parque Nacional de la Sierra de Guadarrama. Estos datos incluyen datos de aforos de vehículos en los aparcamientos del parque, contadores de pisada y encuestas presenciales en los centros de visitantes del parque.

F) Mapas de usos del suelo. Mapas de uso de suelo provenientes del Sistema de Información Sobre Ocupación del Suelo Español (SIOSE), que se han utilizado para refinar la localización de algunas actividades.

2.2 Metodología y casos de uso

2.2.1 Obtención de patrones de movilidad y actividad a partir de registros anonimizados de telefonía móvil

¹ SAE sistema de ayuda a la explotación. El SAE contiene la información GPS de cada vehículo.

El análisis de los datos de telefonía móvil comprende los siguientes subprocesos:

A) Selección de la muestra. Se seleccionan aquellos usuarios que presenten una frecuencia de registros suficiente para obtener patrones de movilidad y actividad con fiabilidad. La muestra resultante representa entre un 15 y un 20% de la población total de España. En función de las necesidades del estudio y de las propiedades de los distintos usuarios, de los usuarios potenciales seleccionan aquellos usuarios que formarán parte de la muestra efectiva.

B) Identificación de lugar de residencia y trabajo Para cada usuario válido se utilizan datos históricos para construir un perfil de actividad. Este perfil recoge las horas de mayor y menor actividad, así como las zonas más visitadas y el tiempo promedio de estancia en cada una de ellas. A partir del perfil de actividad, y cruzando las localizaciones con los mapas de uso de suelo se obtiene la residencia y el lugar de trabajo del usuario.

C) Estimación de movilidad y actividad. Para el o los días de estudio, se reconstruyen la posición de las actividades y los viajes realizados por cada uno de los usuarios incluidos en la muestra de cada día. Se entiende como 'viaje' el desplazamiento entre las localizaciones de dos actividades consecutivas, y como 'actividad' una interacción o conjunto de interacciones con el entorno que tienen lugar en una misma localización y que motivan que el individuo se desplace hasta allí. La información obtenida del perfil de actividades del usuario se combina con distintos criterios de tiempos de estancia para identificar actividades y viajes a partir de los registros del día de estudio, filtrando las estancias intermedias subordinadas al viaje y realizadas entre etapas del mismo (por ejemplo, una parada intermedia en un viaje por carretera).

D) Elevación de la muestra al total de la población. Utilizando información sociodemográfica, la información se expande al total de la población. La opción por defecto es la utilización de factores de elevación basados en el hogar a nivel de sección censal, pero la solución permite otras aproximaciones en función de las características del estudio y la información disponible.

2.2.2 Movilidad en la ciudad de Málaga

A) Movilidad general. La movilidad general en la ciudad de Málaga fue obtenida a partir de los registros de telefonía móvil:

1. Se obtuvo la residencia de todos los usuarios potenciales de la muestra y se filtraron los residentes en Málaga.
2. Se obtuvieron los viajes a nivel muestral para un día laborable promedio. Una vez obtenidos los viajes, se elevó la muestra al total de la población de la ciudad.
3. Los viajes se agregaron en matrices origen destino según una zonificación acordada con el cliente. Estas matrices se segmentaron en tres franjas horarias: hora punta de la mañana, hora punta de la tarde y hora valle.

B) Movilidad en transporte público. Para este estudio se combinaron datos de la tarjeta inteligente de transporte y datos de telefonía móvil. Para la obtención de la movilidad en transporte público se siguieron los siguientes pasos:

1. **Obtención de parada de subida.** Ésta se obtiene directamente de los datos proporcionados por la tarjeta, ya sea de forma explícita o a partir del SAE, en los casos en que sólo se dispone de la información del coche en que se ha validado.

2. **Estimación de parada de bajada.** En los casos en los que la información de la parada de bajada no está disponible (por ejemplo, los autobuses), para la estimación de la parada de bajada se usa información longitudinal de varios días (por ejemplo, la posición de la parada de subida en un tiempo subsecuente es usada para estimar la posición de bajada del viaje anterior). Se emplean criterios de tiempos de espera y de estancia para distinguir entre bajada en parada de destino y bajada en parada de transbordo.
3. **Elevación de la muestra.** La muestra de viajes de transporte público se expandió usando la información de viajes totales.
4. **Estimación de origen real y destino final.** Las matrices obtenidas contienen orígenes y destinos a nivel de parada. Para la estimación del origen y destino real del viaje se reconstruyen las áreas de atracción de cada parada a partir de los datos de telefonía móvil y criterios de accesibilidad (distancia a la parada desde las distintas zonas). Finalmente, el origen y destino final de los usuarios en cada parada es asignado en las distintas zonas pertenecientes al área de atracción en función del potencial de atracción de cada zona, estimado a partir de la información de uso de suelo.

2.2.3 Exposición a la contaminación en la ciudad de Madrid

En este caso de uso se estudió la exposición real de los habitantes de la ciudad de Madrid a las emisiones de NOx. Normalmente la exposición de los habitantes a los contaminantes se estima en base a los niveles de contaminantes en el lugar de residencia. Esta medida no refleja la exposición real, ya que en muchas ocasiones pasamos la mayor parte del día fuera de nuestro lugar de residencia. En este estudio se hizo una estimación dinámica de la exposición a contaminantes considerando la posición real de la población a distintas horas del día.

Los niveles de NOx en las distintas zonas de la ciudad fueron estimados con un modelo de dispersión de partículas desarrollado por el Departamento de Ingeniería Química y Medioambiental de la UPM con datos obtenidos de las estaciones de medición de contaminantes del ayuntamiento de Madrid.

La presencia de personas en las distintas zonas de la ciudad a diferentes horas del día se obtuvo a partir de los datos de telefonía móvil, según la metodología descrita en la Sección 2.2.1. Con esta información se obtuvo un índice de exposición, definido como número de personas por hora multiplicado por la concentración de contaminantes. En la Figura 1 se puede observar una comparativa del valor de este indicador obtenido usando el lugar de residencia y la posición real de las personas a las distintas horas del día en distintas zonas de la ciudad.

Como podemos observar en la figura, estas dos curvas coinciden por la mañana y por la noche. Sin embargo, para la mayor parte de las horas del día son muy distintas. Así, hay zonas donde se está subestimando la exposición real a contaminantes, principalmente zonas con mucha actividad económica, mientras que para zonas de carácter residencial se está sobreestimando.

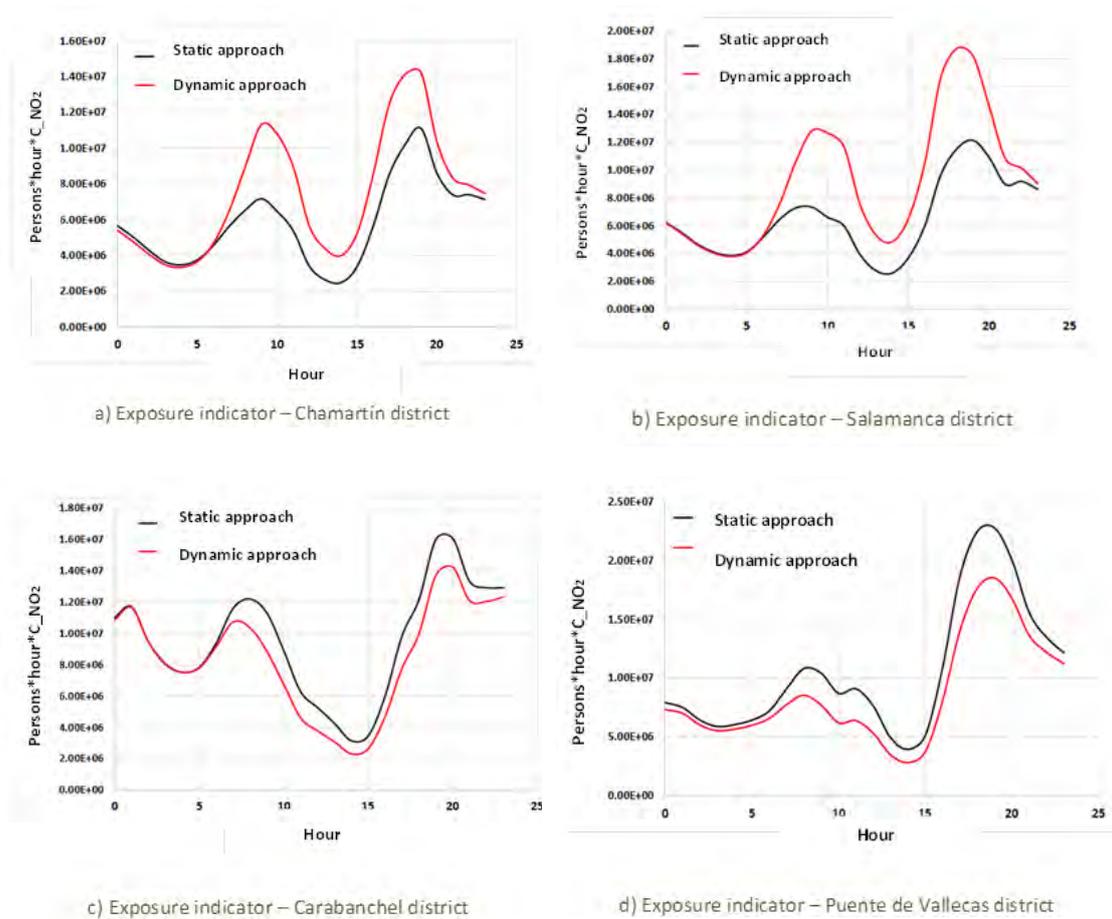


Figura 1. Comparativa del indicador de exposición para distintas horas del día calculado en base al lugar de residencia y a la posición real de la población.

2.2.4 Análisis de los visitantes al Parque Nacional de la Sierra de Guadarrama

Tradicionalmente, la afluencia de visitantes al parque se ha calculado mediante una combinación de datos de aforo en los estacionamientos y contadores de pisadas. Así, gracias a los aforos de parking se puede estimar el número total de visitantes, mientras que los contadores de pisadas dan información sobre las rutas seguidas. Adicionalmente, mediante encuestas de tipificación se pueden obtener la procedencia, edad, género y opiniones de los visitantes al parque. Aunque sean complementarios y se puedan combinar, estos datos no siempre son capaces de capturar la imagen completa sobre los visitantes y su movilidad dentro del parque. Así, no todos los visitantes llegan al parque en coche, algunos aparcan fuera del estacionamiento, y los contadores de pisadas no son capaces de capturar todas las rutas visitadas o a los visitantes que no siguen ninguna ruta. Por otro lado, el tiempo de estancia en el parque no se puede detectar de forma fiable con ninguna de las fuentes mencionadas anteriormente. En este caso de uso, estudiamos los flujos de visitantes al parque usando datos de telefonía móvil. Empleando la metodología descrita en la Sección 2.2.1, se obtuvo la procedencia de los visitantes al igual que la presencia de estos en el parque y la duración de su estancia. Los datos de encuestas, aforos y conteos de pisadas se

utilizaron para corregir la muestra en los casos en que la granularidad espacial de los datos móviles no permitía distinguir correctamente entre usuarios ubicados dentro y fuera del parque. Los datos obtenidos de la telefonía móvil permitieron tener una información completa sobre el perfil (procedencia, edad y género), el tiempo de estancia y el número de visitantes, así como la recurrencia de las visitas, información que resulta complicado obtener de forma fiable a partir de las fuentes tradicionales.

3. Conclusiones

En esta ponencia hemos presentado tres ejemplos distintos del potencial que tiene la explotación de los datos de dispositivos móviles personales obtenidos de forma pasiva, en particular los datos provenientes de las redes de telefonía móvil, para la planificación y diseño de políticas de desarrollo urbano. Los casos de uso presentados muestran que, si bien los datos de telefonía proporcionan una información muy rica, por sí solos no son suficientes para obtener una imagen completa de la movilidad. Es necesario por tanto desarrollar metodologías y algoritmos de fusión de datos, para integrar los datos de telefonía con otras fuentes relevantes para el problema a analizar. Por último, cabe resaltar que la utilización de datos de telefonía móvil abre interesantes oportunidades para la planificación y la gestión de servicios urbanos, tales como la posibilidad de obtener información permanentemente actualizada con un coste reducido o la oportunidad de analizar periodos especiales (Navidad, Semana Santa, etc.) y eventos concretos que influyen significativamente en las dinámicas de la ciudad.

4. Referencias bibliográficas

- [1] S. Çolak, L.P. Alexander, B.G. Alvim, S. R. Mehndiratta, M.C. González (2015), "Analyzing cell phone location data for urban travel: current methods, limitations, and opportunities", *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2526, pp. 126-135.
- [2] M. Picornell, T. Ruiz, M. Lenormand, J. J. Ramasco, T. Dubernet, E. Frías-Martínez, "Exploring the potential of phone call data to characterize the relationship between social network and travel behavior", *Transportation*, vol. 42, nº 4, pp. 647-668, 2015.
- [3] M. Lenormand, A. Tugores, P. Colet, J. J. Ramasco, "Tweets on the Road", *PLoS ONE* 9(8): e105407, 2014.
- [4] S. Sobolevsky, I. Sitjo, R. Tachet Des Combes, B. Hawelka, J. Murillo Arias, C. Ratti, "Money on the move: Big Data of bank card transactions as the new proxy for human mobility patterns and regional delineation. The case of residents and foreign visitors in Spain", *IEEE International Congress on Big Data*, 2014.
- [5] H. Samiul, C. M. Schneider, S. V. Ukkusuri, M.C. González, "Spatiotemporal patterns of human mobility", *Journal of Statistical Physics*, vol. 151, nº 1-2, pp. 304-318, 2013.
- [6] L. Alexander, S. Jiang, M. Murga, and M.C. González, "Origin–destination trips by purpose and time of day inferred from mobile phone data", *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* vol. 58 pp. 240-250, 2015.
- [7] Trépanier, M., Tranchant, N., & Chapleau, R. (2007). Individual trip destination estimation in a transit smartcard automated fare collection system. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 11(1), 1-14.

[8] Munizaga, M. A., & Palma, C. (2012). Estimation of a disaggregate multimodal public transport Origin–Destination matrix from passive smartcard data from Santiago, Chile. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 24, 9-18.

[9] Cui, A. (2006). Bus passenger origin-destination matrix estimation using automated data collection systems (Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology).

[10] Alsger, Azalden A., et al. "Use of smartcard Fare Data to Estimate Public Transport Origin–Destination Matrix." *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2535 (2015): 88-96.

Correspondencia:

Miguel Picornell Tronch
Teléfono: +34 91 838 85 97
E-mail: miguel.picornell@kineo-analytics.com

Cesión de derechos

Por la presente, y como autor del trabajo mencionado arriba, cedo al Palacio de Ferias y Congresos de Málaga una licencia no-exclusiva irrevocable para imprimir, reproducir, distribuir, transmitir o comunicar de cualquier manera dicho trabajo, incluyendo el derecho de hacer modificaciones de formato. Además, afirmo que esta cesión no lesiona los derechos de terceros.