

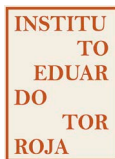


**Monitorización y evaluación de la  
habitabilidad, calidad del aire y  
eficiencia energética de los edificios**

**Experiencias en España**

BIA2017-90912-REDT





Red de excelencia

# MONITOR

BIA2017-90912-REDT

**Monitorización y evaluación de la  
habitabilidad, calidad del aire y  
eficiencia energética de los edificios**

Experiencias en España

**Red de excelencia MONITOR (BIA2017-90912-REDT)**

Monitorización y evaluación de la habitabilidad,  
calidad del aire y eficiencia energética de los edificios

**Investigadora principal:**

Marta Castellote (IETCC-CSIC)

**Coordinación de la publicación:**

**Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja.**

**Consejo Superior de Investigaciones Científicas**

Carmen Alonso, Ignacio Oteiza y Fernando Martín-Consuegra

**Instituto Valenciano de la Edificación**

Begoña Serrano, Isabel de los Ríos y Mar Alonso

© los autores

ISBN: 978-84-122767-4-9

Edición 2020

# Índice

<b>Introducción</b>	<b>5</b>
<b>GT1 Información</b>	<b>9</b>
Redes inalámbricas de sensores para la monitorización de edificios CARMA-ITEFI-CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS (CSIC)	13
Monitorización de Sistemas Constructivos, Edificios y Entornos Urbanos en la Unidad de I+D UiE3 del CIEMAT UNIDAD DE I+D SOBRE EFICIENCIA ENERGÉTICA EN LA EDIFICACIÓN (UiE3). CIEMAT	23
Métodos de obtención de información para caracterización térmica de muros en edificios existentes MAEE/3D-VCR. UNIVERSIDAD DE CASTILLA LA MANCHA (UCLM)	37
Sistema de información del sistema Cyber-Físico SmartPoliTech SmartPoliTech. UNIVERSIDAD DE EXTREMADURA (UNEX)	49
Monitorización energética de la ETSIT de la Universidad Politécnica de Madrid ROBOLABO - E.T.S.I. Telecomunicación. UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID (UPM)	59
La digitalización de la energía y el confort como motor de transformación energética Stechome	69
Encuesta Redes de Monitorización RED MONITOR	77
<b>GT2 Recintos / Celdas / Módulos</b>	<b>89</b>
Laboratorio de ensayos Energéticos para Componentes de la Edificación (LECE) de la Unidad de I+D UiE3 del CIEMAT UNIDAD DE I+D SOBRE EFICIENCIA ENERGÉTICA EN LA EDIFICACIÓN (UiE3). CIEMAT	93
Módulos experimentales en proyectos de investigación del Grupo SCHE-IETcc-CSIC SCHE-IETCC. CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS (CSIC)	107
Análisis térmico de un edificio Earthbag en clima continental Mediterráneo SEMB. UNIVERSIDAD DE LLEIDA	119
Celdas de ensayo como herramienta de rehabilitación energética de fachadas TEP 130. UNIVERSIDAD DE SEVILLA (US)	127
Ensayos experimentales de estrategias de mejora de la eficiencia energética en los demostradores EDEA CICE INTROMAC	139
Desarrollo de una instalación de bajo costo para la investigación de confort interior CBBC-UTFPR. Universidad Tecnológica Federal de Paraná (Brasil)	149
Conversión fotovoltaica para aire acondicionado en Madrid IETCC. CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS (CSIC)	159

## GT3 Edificios 175

Monitorización del consumo de energía y ambiente interior en edificios de viviendas INSTITUTO VALENCIANO DE LA EDIFICACIÓN (IVE) . GENERALITAT VALENCIANA	181
Monitorización de edificios del Grupo SCHE - IETcc - CSIC SCHE-IETCC. CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS (CSIC)	195
Análisis Experimental de Edificios en la Unidad de I+D UiE3 del CIEMAT UNIDAD DE I+D SOBRE EFICIENCIA ENERGÉTICA EN LA EDIFICACIÓN (UiE3). CIEMAT	209
Metodología para la caracterización térmica de construcciones tradicionales en clima mediterráneo Ee/3D-VCR. UNIVERSIDAD DE CASTILLA LA MANCHA (UCLM)	221
La monitorización en la evaluación de soluciones de protección solar en edificios terciarios TEP 130. UNIVERSIDAD DE SEVILLA (US)	235
MODIF-HABIT: La experiencia del grupo ABIO-UPM en monitorización aplicada a un proyecto de investigación ABIO. UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID (UPM)	245
Metodología para la monitorización de un edificio docente COMPHAS y ROBOLAB. UNIVERSIDAD DE EXTREMADURA (UNEX)	253
Sistema abierto y escalable de supervisión, gestión eficiente de la energía y control del confort del edificio CIESOL basado en IoT y Cloud Computing Grupo ARM. UNIVERSIDAD DE ALMERIA	267
La monitorización de la calidad del aire interior como herramienta de evaluación y mejora de la salubridad de un espacio InBiot Monitoring S.L.	279

## GT4 Barrios 295

Análisis experimental de entornos urbanos realizados por la Unidad de I+D UIE3 del CIEMAT UNIDAD DE I+D SOBRE EFICIENCIA ENERGÉTICA EN LA EDIFICACIÓN (UiE3).CIEMAT	297
Monitorización de la isla de calor en la ciudad de Madrid ABIO. UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID (UPM)	309
Análisis energético de los edificios de la Universidad de Lleida SEMB. UNIVERSIDAD DE LLEIDA	321
Monitorización para el desarrollo de modelos predictivos a escala urbana TEP 130. UNIVERSIDAD DE SEVILLA (US)	331
Monitorización de barrios residenciales de promoción pública de Madrid con edificación altamente ineficiente y población vulnerable SCHE-IETCC. CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS (CSIC)	343
Hacia una monitorización de barrio UNIZAR	355
Monitorización energética y confort en barrios de viviendas sociales en Extremadura INTROMAC	365

# Introducción

Coordinación técnica de la RED MONITOR

IETcc-CSIC

Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja. Consejo Superior de Investigaciones Científicas

Carmen Alonso. [c.alonso@ietcc.csic.es](mailto:c.alonso@ietcc.csic.es)

Ignacio Oteiza. [ioteiza@ietcc.csic.es](mailto:ioteiza@ietcc.csic.es)

Fernando Martín-Consuegra. [martin-consuegra@ietcc.csic.es](mailto:martin-consuegra@ietcc.csic.es)

En los edificios, los componentes y elementos constructivos se integran, proporcionándonos espacios para el pleno desarrollo de la vida. Esto implica la construcción de ambientes adecuados para el uso, en los que se garantice el confort térmico, acústico, lumínico, visual, y una buena calidad del aire, en general lo que denominamos HABITABILIDAD, aunque este término puede incluir además otros aspectos.

En esta publicación se recogen experiencias recientes de los grupos que participan en la RED MONITOR. Esta red temática, financiada por el Ministerio de Ciencia y Tecnología (Proyecto BIA 2017-90912-REDT), surge con vocación de integrar a grupos de investigación que tienen un amplio recorrido de investigación en edificación, y que utilizan la monitorización como herramienta para sus estudios.

## ¿Por qué monitorizar?

Hay motivos muy diversos para plantear una monitorización. En general las medidas nos ofrecen información sobre el comportamiento de determinados sistemas, o de las condiciones ambientales en las que se desarrolla la actividad. Estos datos recabados a diferentes escalas, permiten generar modelos tanto para nueva construcción como para la rehabilitación de edificios existentes.

La monitorización también se plantea ante la necesidad de reducir la brecha que existe entre los datos estimados con modelos y el comportamiento real. En el caso de la simulación energética, actualmente es necesario complementar el análisis predictivo con datos reales de comportamiento. Esto permitiría reducir estas diferencias, adaptar las actuaciones a las múltiples realidades

sociales dando además apoyo para la actualización de los estándares existentes.

La medición y verificación permite por otro lado reducir la incertidumbre en las actuaciones de rehabilitación. Nos permite establecer un escenario base para estimar con un menor error la mejora que supone la modificación de los sistemas constructivos. Además, una vez ejecutada la actuación, permite verificar los resultados obtenidos, una tarea con un importante desarrollo potencial en nuestro entorno a día de hoy.

También permite informar a los usuarios del edificio sobre aspectos relevantes como su consumo energético, calidad del aire, o impacto ambiental generado. Esta información facilita la toma de decisiones para la mejora, pero, sobre todo, permite que dichos usuarios participen de manera activa en la mejora ambiental de sus inmuebles.

## IoT

Actualmente estamos rodeados de millones de sensores que nos acompañan con nuestro teléfono móvil, con los dispositivos domésticos, o elementos de control en los edificios de oficinas o terciarios. Estamos ya muy acostumbrados a que todo tipo de objetos se conecten a la red y trabajen de manera inteligente, aprendiendo por ejemplo a adaptar la temperatura de nuestra casa en función de nuestros hábitos, detectando averías, o mapeando la distribución de muebles para poder limpiar el suelo con eficacia.

En los trabajos que aquí se presentan se utilizan diferentes tipos de datos y equipos, más o menos portátiles, con mayor o menor precisión, y de precio muy variado, con objetivos centrados en la mejora de la ca-

lidad del aire y eficiencia energética de los edificios, de un conjunto de edificios, del barrio y de la ciudad. Es importante no perder de vista que se trata de un recurso material, que ha generado un impacto en su fabricación, que tiene un mantenimiento, que generan una necesidad de almacenamiento, procesado, e infraestructura asociada, y que muy fácilmente se pueden convertir en residuo en un corto espacio de tiempo.

Los dispositivos de menor precisión o de bajo coste con capacidad de toma de datos masiva nos permiten abordar conjuntos de edificios o la rehabilitación integral de barrios, barriendo una mayor cantidad de casos. Además, pueden ser accesibles para los usuarios y conectados a una plataforma base permiten un análisis en red. En estos trabajos resulta importante seleccionar bien las variables que se ajusten a los objetivos del análisis para minimizar la cantidad de sensores o datos recogidos.

Otras mediciones de precisión, o con equipos más sofisticados para un análisis detallado, permiten avanzar en la caracterización de materiales o componentes innovadores. Además, permiten profundizar en el análisis de casos específicos, o trabajar sobre problemas puntuales detectados en determinados edificios.

En cualquiera de los dos casos, la toma de datos se integra con otro tipo de información externa, robusta, que permite no multiplicar esfuerzos.

## Datos abiertos

Los grupos de investigación que aquí están representados se apoyan a menudo en datos de referencia recabados por otros organismos. Es por ejemplo el caso de los datos meteorológicos de AEMET, las estadísticas de población, edificios o calidad de vida del INE, las condiciones de la edificación de DG Catastro, o los datos espaciales recopilados por el IGN.

Una gran cantidad de datos que se obtienen a través de diferentes dispositivos, disciplinas, programas, buscadores, navegadores, nos rodean, “nos controlan”, en muchos casos, sin duda lo que se conoce como “minería de datos”, “Data Science”, que nos permite relacionar diferentes bases de datos, es un futuro importante para cualquier disciplina, también la de la edificación y la de la de la habitabilidad.

En particular los datos abiertos nos ofrecen la posibilidad de avanzar de manera coordinada en la generación del conocimiento, de la mano de todos aquellos sectores que se nutren y proporcionan esta información. Hay ya ejemplos de gestión de datos en la generación de modelos de ciudad. En la “ciudad inteligente” se están integrando datos de organismos, usuarios e industria. Tanto en el espacio público como en el privado se recaban datos a destajo. ¿A quién pertenece la información recogida? ¿Quién la controla o la utiliza, y con qué fin? ¿Se está teniendo en cuenta la privacidad de las personas?

Es en este momento en el que no se puede perder de vista el bien común que se persigue, integrando la componente ética en esta monitorización.



# GT1

## Información



onitoRED

## Grupos de investigación

---

G-CARMA-ITEFI-CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS (CSIC)

Redes inalámbricas de sensores para la monitorización de edificios

UNIDAD DE I+D SOBRE EFICIENCIA ENERGÉTICA EN LA EDIFICACIÓN (UiE3)  
CIEMAT

Monitorización de Sistemas Constructivos, Edificios y Entornos Urbanos en la Unidad de I+D UiE3 del CIEMAT. Medida directa, indirecta e índices

MAEE y 3D-VCR  
UNIVERSIDAD DE CASTILLA LA MANCHA (UCLM)

Métodos de obtención de información para caracterización térmica de muros en edificios existentes. Casos de estudio, descripción de la metodología y conclusiones

## Grupos invitados

---

SmartPoliTech  
UNIVERSIDAD DE EXTREMADURA (UNEX)

Sistema de información del sistema Cyber-Físico SmartPoliTech

ROBOLABO - E.T.S.I. Telecomunicación  
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID (UPM)

Monitorización energética de la ETSIT de la Universidad Politécnica de Madrid

## Empresa colaboradora

---

Stechome

La digitalización de la energía y el confort como motor de transformación energética

## Grupo de Trabajo 1 - Información

---

Encuesta Redes de Monitorización

# GT1

## Información

Coordinación  
CARMA-ITEFI-CSIC  
Margarita González Hernández  
m.g.hernandez@csic.es

En el capítulo dedicado al Grupo de Trabajo 1: Información se exponen ponencias de los grupos G-CARMA, UiE3 CIEMAT, MAEE y 3D-VC&R, ROBOLABO, SmartPoliTech; de la empresa Stechome y un artículo con los resultados de la encuesta realizada entre los miembros de la Red sobre redes de monitorización. Los trabajos presentados tienen un punto común la MONITORIZACIÓN para el estudio del comportamiento energético. Estos trabajos muestran la multidisciplinaridad de los grupos, la experiencia en desarrollos y utilización de diferentes sistemas y plataformas in situ durante largos períodos de tiempo, así como las técnicas más utilizadas para el procesamiento de la información.

El grupo G-CARMA expone diferentes sistemas basados en redes inalámbricas de sensores desarrollados por el grupo para la monitorización de diferentes materiales usados en edificación. En este trabajo se describen brevemente tres aplicaciones para las que se han desarrollado estos sistemas y los escenarios de monitorización utilizados. En la primera aplicación se estudió el efecto de la calefacción en los paramentos de dos Iglesias en la Comunidad de Madrid: San Juan Bautista en Talamanca del Jarama y Nuestra señora de la Asunción en Algete. En el segundo, se estudiaron las propiedades higrotérmicas de un muro de adobe en una casa en Campo de Criptana; y la influencia de las condiciones climatológicas en diferentes tipos de madera para su uso como material estructural. La última aplicación se realizó en el edificio sede del ITEFI donde se monitorizó la calidad del aire y la presencia de radón en los sótanos, así como el análisis de comportamiento de diferentes redes inalámbricas con diferentes protocolos de enrutamiento.

La Unidad de Eficiencia Energética en la Edificación del CIEMAT, UiE3 CIEMAT, tiene una larga experiencia en la realización y análisis de evaluaciones energéticas de edificios y de entornos urbanos. En este contexto, se han desarrollado y aplicado metodologías de medida y análisis de datos experimentales para la evaluación experimental de sistemas constructivos, edificios construidos en condiciones reales de uso, y entornos urbanos. En este artículo, se presentan las monitorizaciones realizadas por la UiE3 más recientemente o que presentan alguna singularidad, identificando las variables monitorizadas y el período experimental seleccionado. En los diferentes escenarios de medida se identifican las variables que fueron registradas y el período experimental seleccionado. Además, se muestran medidas indirectas e indicadores relevantes en la caracterización energética experimental.

Los grupos MAEE y 3D-VC&R de la Universidad de Castilla La Mancha presentan la aplicación de los métodos habituales de obtención y procesado de datos de temperatura y humedad a través de varios casos de estudio de elementos constructivos de fachada. Se han seleccionado tres casos: análisis de la fachada vegetal (Escuela Politécnica de Cuenca), medición de transmitancia en un muro de tierra de gran inercia (Vivienda en Campo de Criptana) y medida de temperaturas superficiales en espacio interior (Instituto de Tecnología de la Construcción y Telecomunicaciones, Cuenca). Estos casos utilizan diferentes sistemas de monitorización para la medida de la temperatura, humedad y flujo de calor para interpretar el comportamiento térmico de los elementos constructivos estudiados a lo largo del tiempo; detallando la instrumentación y los procedimientos

seguidos para el tratamiento de los datos y obtención de resultados.

El grupo ROBOLADO de la UPM presenta los resultados de un sistema de monitorización energética instalado en 5 edificios de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación (ETSIT), de la Universidad Politécnica de Madrid. Los 5 edificios permiten disponer de información de tres tipos de perfiles diferentes: un entorno residencial, centro de investigación y un entorno de oficinas. El sistema de monitorización adquiere variables energéticas en tiempo real que posteriormente procesa e incorpora a una base de datos para su análisis y visualización en tiempo real. Este sistema ha permitido la implementación de técnicas de gestión de la demanda y junto con diferentes tamaños de generación ha permitido reducir la variabilidad de la demanda un 20 % así como un mejor aprovechamiento de las fuentes de generación local; incrementando el autoconsumo y favoreciendo una mejor integración del generador local.

El grupo de la Universidad de Extremadura, SmartPoliTech, presenta un Sistema Ciber-Físico, SCF, en desarrollo dentro de su Escuela Politécnica. La interconexión del mundo físico - sensores y actuadores - con el mundo virtual con el objetivo de, entre otros, mejorar la eficiencia energética de los edificios a partir del histórico de datos, se realiza en el SCF SmartPoliTech a través de una arquitectura orientada a servicios. El objetivo principal es la transformación de sus instalaciones en un gran ecosistema experimental, un living-lab para el diseño, implementación, integración y validación de sistemas capaces de crear y gestionar entornos inteligentes y

sostenibles. SmartPoliTech hace uso de tecnologías IoT para promover entre sus usuarios hábitos responsables de consumo de los recursos en el centro, mientras que a la vez intentar mejorar la eficiencia en cuanto al uso de los recursos energéticos en sus instalaciones.

El trabajo presentado por la empresa Stechome nos presenta su enfoque sobre la importancia de la monitorización para los procesos de empoderamiento frente a la energía de las familias y consumidores y el reflejo de la situación actual de los procesos de monitorización, los agentes que participan y su relación con el mercado y las necesidades reales del mismo. Así como el planteamiento de los retos de la monitorización y del uso de los datos como motor de cambio en el modelo energético actual.

Dentro del trabajo realizado por el Grupo de Trabajo 1 – Información de la Red Monitor se realizó una encuesta entre los miembros de la Red sobre las redes de monitorización. El objetivo de la encuesta fue recopilar información de todos los grupos de la red sobre qué sistemas de monitorización utilizan, el software, el método de procesamiento de la información, con qué finalidad, la estructura de almacenamiento de datos, disponibilidad de los mismos, etc. En el artículo titulado Redes de Monitorización se presentan los resultados obtenidos en dicha encuesta.



# Redes inalámbricas de sensores para la monitorización de edificios

CARMA-ITEFI-CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS (CSIC)

S. Aparicio (1), I. Sicilia (2), G. Anaya Catalán (3), M.G. Hernández (4), J.J. Anaya (5)

(1) Dra. Matemáticas. Investigador Postdoctoral. ITEFI, CSIC, Madrid (España).

(2) Arquitecta Contratada. ITEFI, CSIC, Madrid (España).

(3) Técnico FP. Técnico de Laboratorio, CAM. ITEFI, CSIC, Madrid (España).

(4) Dra. Ing. Industrial. Científico Titular. ITEFI, CSIC, Madrid (España).

(5) Dr. en Físicas. Investigador Científico. ITEFI, CSIC, Madrid (España).

Persona de contacto: s.aparicio@csic.es (S. Aparicio)

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4069-015X> (S. Aparicio); <http://orcid.org/0000-0003-4527-4817> (I. Sicilia);

<http://orcid.org/0000-0002-0304-1612> (M. G. Hernández); <http://orcid.org/0000-0003-2415-471X> (J. J. Anaya)

## Redes inalámbricas de sensores para la monitorización de edificios

### RESUMEN

El uso de redes inalámbricas de sensores para la monitorización de estructuras está en auge debido a su bajo coste, facilidad de instalación y mantenimiento. Además, con la reciente necesidad de que no sólo las personas sino también las cosas estén conectadas, Internet de las cosas (IoT), hace que esta tecnología se use cada vez en más aplicaciones. En este trabajo se hace una exposición de diferentes sistemas basados en redes inalámbricas y desarrollados por el grupo G-CARMA del Instituto de Tecnologías Físicas y de la Información “Leonardo Torres Quevedo” (ITEFI) para la monitorización de diferentes materiales usados en edificación. Se describen brevemente las aplicaciones para las que se han desarrollado estos sistemas y los escenarios de monitorización: iglesias, cubos de madera, muros de adobe y el edificio sede del ITEFI. Se analizaron los sistemas usados y las dificultades encontradas. A pesar de la problemática encontrada se concluyó que estos sistemas son adecuados para la monitorización de edificios.

**Palabras clave:** monitorización; redes inalámbricas de sensores; IoT; edificios.

## *Wireless sensor networks for building monitoring*

### ABSTRACT

*The use of wireless sensor networks for monitoring structures is increasing due to their low cost, ease of installation and maintenance. Furthermore, with the recent need for not only people but also things to be connected, the Internet of Things (IoT) makes this technology increasingly used in more applications. In this work, an exposition of different systems based on wireless sensors networks and developed by the G-CARMA group of ITEFI for the monitoring of different materials used in building is made. The applications for which these systems have been developed and the monitoring scenarios are briefly described: churches, wooden cubes, adobe walls and ITEFI building. The systems used and the difficulties encountered were analyzed. Despite the problems encountered, it was concluded that these systems are suitable for monitoring buildings.*

**Keywords:** *monitoring; wireless sensor networks; IoT; buildings.*



# 1. Introducción

Los avances en la comunicación inalámbrica y dispositivos microelectrónicos han conducido al desarrollo de sensores de bajo consumo y al despliegue a gran escala de redes de sensores. Dada la capacidad de vigilancia de dichas redes de sensores, se han utilizado en diferentes aplicaciones, tales como el monitoreo de hábitats, seguimiento de objetos, vigilancia del medio ambiente, militar, gestión de desastres, así como en entornos inteligentes. Dos de los requisitos esenciales para estas aplicaciones son la ejecución en tiempo real y un control fiable de estas.

Las redes inalámbricas de sensores (WSN, por sus siglas en inglés) consisten en dispositivos integrados distribuidos e inalámbricamente habilitados capaces de emplear una variedad de sensores electrónicos. La característica más atractiva de las WSNs es su autonomía, evitando la necesidad de un cableado costoso y desgarrado entre nodos, en lugar de depender de la flexibilidad de los algoritmos de enrutamiento para transportar información de nodo a nodo. Esto permite que los nodos se implementen en casi cualquier ubicación y para cualquier aplicación.

En este trabajo se presentan varias aplicaciones de monitorización de diferentes materiales usados en edificación utilizando redes inalámbricas de sensores.

## 2. Redes inalámbricas de sensores

Una red inalámbrica de sensores es un conjunto de nodos, habitualmente llamados motas, que se comunican entre sí inalámbricamente. Estos nodos constan principalmente de un microcontrolador equipado con sensores y un chip de radio. En estas redes el nodo encargado de recoger toda la información de la red es llamado gateway o estación base.

La topología de enrutamiento, es decir, el camino que debe seguir la información transmitida por cada nodo hasta llegar a la base y transmitirla al usuario, es determinante para el funcionamiento de la red. Existen diferentes topologías - estrella, árbol, malla, etc.- que se adecúan a cada tipo de aplicación. Una vez recibidos los datos a través del gateway, la información debe

ser almacenada, procesada, analizada y presentada al usuario de la forma más apropiada y, en ocasiones, es muy importante que esto se realice en tiempo real.

Los avances en la comunicación inalámbrica y dispositivos microelectrónicos han conducido al desarrollo de sensores de bajo consumo y al despliegue a gran escala de redes de sensores. Esto es debido, principalmente, a su bajo coste, su facilidad de despliegue y por ser autoconfigurables, pudiendo convertirse en todo momento en emisor o receptor, así como registrar datos referentes a los sensores locales de cada nodo. Otra de sus características más importante, es la gestión eficiente de energía ya que este tipo de redes deben tener una alta tasa de autonomía para que sean plenamente operativas durante largos periodos de tiempo.

Por consiguiente, uno de sus principales inconvenientes es el consumo energético, el cual debe estar limitado ya que tiene que conjugar autonomía con capacidad de proceso. Esta limitación afecta al hardware y al transceptor radio, que deberán ser lo más sencillo posibles, lo que conduce a una capacidad de proceso limitada. También hay que tener en cuenta la vulnerabilidad de los nodos, haciendo de la seguridad una de las claves más importantes en este tipo de redes.

### 2.1. Plataformas hardware

En este trabajo se usaron motas de 3 empresas diferentes: MEMSIC, Libelium y Arduino, Figura 1.

La empresa americana Crossbow fue una de las primeras en desarrollar redes inalámbricas de sensores y posteriormente fue comprada por MEMSIC.

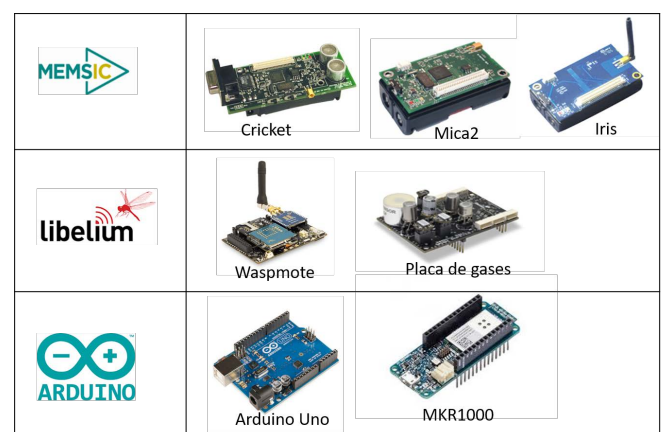


Figura 1. Diferentes motas usadas en este trabajo.

Esta empresa ofrece diferentes tipos de motas con diferentes procesadores y chips de radio. En este trabajo se usaron las motas Cricket, Mica2 e IRIS por ser las que más se ajustaban a las necesidades de los trabajos. Uno de sus puntos fuertes es que su software y hardware eran libres, aunque su coste era alto. Hoy en día están obsoletas.

La empresa Libelium es una empresa española que surgió hace poco más de una década. Se han especializado en desarrollar soluciones cerradas para diferentes proyectos empresariales. Uno de los inconvenientes de sus motas es que su hardware no es libre.

La empresa italiana Arduino es la más usada hoy en día debido a su fácil uso, bajo coste y su software y hardware libres.

## 2.2. Topología de enrutamiento

La topología de enrutamiento, es decir, el camino que debe seguir la información transmitida por cada nodo hasta llegar a la base y transmitirla al usuario, es determinante para el funcionamiento de la red. Existen diferentes topologías - estrella, árbol (tree en inglés), malla (mesh en inglés), etc.- que se adecúan a cada tipo de aplicación, Figura 2. Una vez recibidos los datos a través del Gateway o base, la información debe ser almacenada, procesada, analizada y presentada al usuario de la forma más apropiada y, en ocasiones, es muy importante que esto se realice en tiempo real.

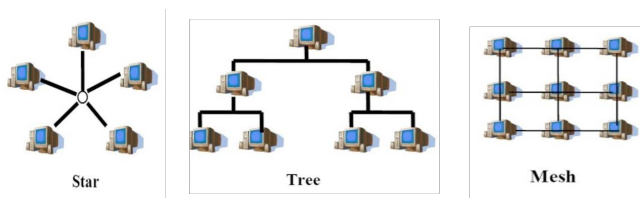


Figura 2. Protocolos de enrutamiento más usados.

## 2.3. Consumo energético

Debido a que estos sistemas suelen funcionar con baterías, el consumo energético debe estar limitado ya que tiene que conjugar autonomía con capacidad de proceso. Por ello a veces es necesario aplicar ciclos de trabajo y técnicas de harvesting.

Existen diferentes algoritmos comerciales para el enrutamiento de la información entre nodos, pero sigue siendo necesario mejorarlos ya que, dependiendo de la aplicación, la tasa de fallos en el envío de mensaje todavía es alta. Una mejora de los algoritmos también repercute en la reducción del consumo energético de la red, la eficiencia y una mejor adaptación a aplicaciones concretas.

## 3. Uso de redes inalámbricas de sensores en diferentes escenarios

En esta sección se describen varias aplicaciones realizadas por el grupo G-CARMA del ITEFI en colaboración con diferentes centros de investigación para la monitorización de 4 escenarios diferentes: iglesias, estructuras de madera, arquitectura de adobe y edificio histórico.

### 3.1. Iglesias

En colaboración con el Instituto de Geociencias del CSIC (IGEO) se estudió el efecto de la calefacción en los paramentos de dos Iglesias: San Juan Bautista en Talamanca del Jarama y Nuestra señora de la Asunción en Algete (1-2), Figura 3. Para ello se desarrolló un sistema de monitorización ad-hoc que estuvo midiendo más de 1 año. El sistema estaba basado en dos redes: una compuesta por motas Mica2 (MEMSIC) y otra por motas Waspnote (Libelium). La red MEMSIC se usó en el interior de la iglesia y se midió temperatura y humedad en diferentes posiciones y alturas de las paredes. La red Libelium se usó para monitorizar diferentes gases en el interior del templo como  $O_3$ ,  $CO$ , luminosidad y vibraciones, así como las condiciones ambientales exteriores mediante una estación meteorológica.

### 3.2. Estructuras de madera

En colaboración con el Instituto de la Construcción Eduardo Torroja del CSIC se monitorizaron 2 cubos de madera, uno de pino y otro de abeto en 3 localizaciones diferentes con diversas condiciones ambientales: Madrid, Sevilla y Ávila, (3), Figura 4.

El objetivo fue estudiar cómo afectan las diferentes climatologías a diferentes tipos de madera para su uso como material estructural. Para ello se desarrolló un sis-

tema de monitorización basado en motas IRIS (MEM-SIC) para medir temperatura y humedad en el interior de la madera de cada una de las caras de los cubos.

### 3.3. Arquitectura tradicional

En colaboración con la Universidad de Castilla La Mancha y el Instituto Torroja del CSIC se monitorizó durante un año una casa de adobe en Campo de Criptana. Para ello, se adaptó el sistema utilizado en los cubos de madera. Además, en esta aplicación, se usaron unos dispositivos sensores diseñados por los autores para medir temperatura y humedad a diferentes profundidades del muro de adobe. El objetivo de este trabajo era estudiar las propiedades higrotérmicas del muro (4). El sistema utilizado para la monitorización se describe en el artículo “Métodos de obtención de información para caracterización térmica de muros en edificios existentes Casos de estudio, descripción de la metodología y conclusiones” de este mismo libro.

### 3.4. ITEFI

La sede del ITEFI es un edificio histórico construido 1943 cuyo uso siempre ha sido un instituto de investigación del CSIC, Figura 6. En este edificio se desarrollaron varios experimentos.

Uno de los experimentos consistió en una comparativa de motas comerciales (MEMSIC, Cricket, Mica2 e Iris) para estudiar la pérdida de mensajes, el consumo energético y la estabilidad de las comunicaciones, así como la monitorización de temperatura y humedad (5), Figura 7.

El segundo experimento se realizó en colaboración con el Instituto de la Construcción Eduardo Torroja, para analizar la calidad del aire en los sótanos del Instituto. Para ello se monitorizaron varios parámetros: temperatura y humedad, presión, gases ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{CO}$ , contaminantes del aire) y Radón, Figura 8. Para ello el grupo G-CARMA desarrolló varios sistemas de monitorización usando protocolos de IoT: un sistema basado en Arduino MKR1000 para medir temperatura y humedad y otro sistema basado en Arduino Uno para la medida de Radón. Además, se usó el sistema de gases de Libelium utilizado previamente en las iglesias. Estos sistemas se integraron usando el protocolo de IoT MQTT. MQTT son las siglas MQ Telemetry Transport, aunque en primer



Figura 3. Iglesias de San Juan Bautista (izqda.) y de Nuestra señora de la Asunción (dcha.).



Figura 4. Cubos de madera y pino monitorizados.



Figura 5. Fachada de la vivienda monitorizada en Campo de Criptana.



Figura 6. Fachada del Instituto de Tecnologías Físicas y de la Información “Leonardo Torres Quevedo”.

lugar fue conocido como Message Queing Telemetry Transport. Es un protocolo de comunicación M2M (machine-to-machine) de tipo message queue.

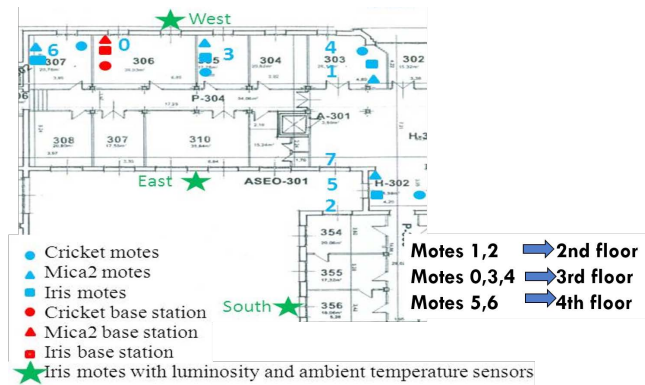


Figura 7. Plano del interior del ITEFU con las posiciones de las motas.



Figura 8. Sistema para medir gas Radón.

## 4. Discusión

En esta sección se hace una comparación de los sistemas usados en los escenarios presentados aquí, ver Tabla 1, y se exponen los inconvenientes encontrados.

### 4.1. Recursos limitados memoria y ancho de banda

Los nodos de sensores están limitados en potencia, capacidad computacional y memoria. Algunos nodos de sensores pueden fallar o bloquearse debido a la falta de potencia, daño físico o interferencia ambiental. El fracaso debido a los nodos sensores no afecta la tarea global de la red de sensores.

Las comunicaciones inalámbricas más usadas son WiFi, Bluetooth y Zigbee. En la Tabla 2 se puede ver un resumen de las características de éstos 3 tipos de comunicación.

En la Tabla 3 se presenta un resumen de las características de memoria y ancho de banda de las redes usadas en este trabajo. Se debe tener en cuenta que las motas Cricket, Mica2, Iris y MKR1000 tienen el chip de Radio incorporado en la mota. En cambio, Wasmote y Arduino son más versátiles pueden usar diferentes tipos de comunicaciones, Zigbee, Bluetooth o Wifi. Se ha considerado que las dos usan las más típicas en este tipo de trabajos que es Zigbee.

En las aplicaciones presentadas aquí, ver Tabla 3, cada vez que se mide un dato se envía a la base por lo que no hubo problemas de memoria. La mota con menor ancho de banda de las usadas aquí es Cricket, pero la cantidad de datos que se envió a la base y el tiempo entre medidas era suficiente en estas aplicaciones. Pero si se quisiera medir con mayor frecuencia puede haber problemas con los envíos debido a que algunas motas tienen un ancho de banda pequeño.

### 4.2. Consumo de energía

Uno de los principales inconvenientes de las redes de sensores, como ya se ha dicho antes, es el consumo energético, el cual debe estar limitado ya que tiene que conjugar autonomía con capacidad de proceso. En este tipo de sistemas lo que más consume es el microcontrolador, las comunicaciones inalámbricas y los sensores.

Tabla 1. Descripción de los sistemas inalámbricos usados en cada aplicación.

Aplicación	Tipo de mota	Comunicación	Número de Motas	Topología de red	Alimentación	Sensores	Duración (días)	Frecuencia de envío de datos (minutos)
Iglesias	Mica2	868/916 MHz	8		Corriente alterna	Temperatura, Humedad, Velocidad del aire	365	2
	Libelium	2.4 GHz Zigbee	4	Malla	Batería de Litio, corriente alterna y célula fotovoltaica	CO <sub>2</sub> , O <sub>3</sub> , Luminosidad, Vibración, Estación meteorológica	365	5
Cubos de madera	Iris	2.4 GHz Zigbee	2	Árbol	6 Baterías AA	Temperatura, Humedad	365	5
Paredes de adobe	Mica2	900 MHz	2	Árbol	12 Baterías AA	Temperatura, Humedad	361	5
Edificio del ITEFI	Cricket	433 MHz	8	Árbol	2 Baterías AA	Temperatura, Luminosidad	6	2
	Mica2	900 MHz	8	Árbol	2 Baterías AA	Temperatura, Luminosidad	6	2
	Iris	2.4 GHz Zigbee	8	Árbol	2 Baterías AA	Temperatura, Luminosidad	6	2
	Arduino MKR1000	WiFi	1	Punto a punto	Corriente alterna	Temperatura, Humedad	30	2
	Arduino Uno	Cable	1		Corriente alterna	Radón	30	10
	Libelium	Cable	1		Batería de Litio y corriente alterna	CO <sub>2</sub> , CO, O <sub>3</sub> , Contaminantes del aire, Presión	30	10

Tabla 2. Características de los principales estándares de comunicación inalámbrica.

Estándar	WIFI	Bluetooth	ZigBee
Aplicación principal	WLAN	WPAN	Control y monitorización
Memoria necesaria	1MB y más	250 KB y más	4KB a 32 KB
Vida Baterías (Días)	0.5 a 5	1 a 7	100 a 1000 y más
Tamaño red	32 nodos	7	65000
Velocidad	54 Mbps	720 Kbps	20 a 250 Kbps
Cobertura (metros)	100	10	100
Parámetros más importantes	Velocidad y flexibilidad	Perfiles de aplicación	Fiabilidad, bajo consumo y bajo costo

Tabla 3. Memoria y ancho de banda de las motas usadas en este trabajo.

Mota	Memoria	Ancho de banda
Cricket	4KB RAM, 128KB ROM, 512KB EEPROM	19.2 Kbps
Mica2	4KB RAM, 128KB ROM, 512KB EEPROM	38.4 Kbps
Iris	8KB RAM, 128KB ROM, 512KB EEPROM	250 Kbps
Waspnote	8KB RAM, 128KB ROM, 4KB EEPROM	250 Kbps
Arduino UNO	2KB RAM, 32KB ROM, 1KB EEPROM	250 Kbps
Arduino MKR1000	32KB RAM, 256KB ROM, 0KB EEPROM	54 Mbps

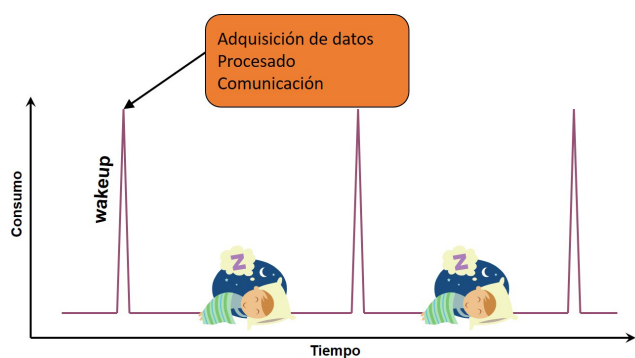


Figura 9. Ciclos de trabajo.

En la mayoría de las aplicaciones mostradas en este trabajo el consumo de energía no estaba limitado ya que se tenía acceso a la red eléctrica. En estos casos, hubo problemas con los ordenadores encargados de recibir los datos debidos a cortes en la red eléctrica. Para ello se optó por el uso de ordenadores de bajo consumo y con alimentación independiente. Estos ordenadores son capaces de reiniciarse ante un corte de red eléctrica, cosa que un ordenador normal no puede hacer.

En otras aplicaciones, como en los cubos de madera, que se usaban 6 baterías de tipo AA, era necesario sustituirlas cada 6 meses. También en la casa de adobe se utilizaron 12 baterías para que el sistema pudiera medir desatendido aproximadamente 1 año. Para ello, además de usar un mayor número de baterías también se usaron algoritmos de ciclo de trabajo, Figura 9. Estos algoritmos consisten en que las motas estén mayormente dormidas y se despierten cada cierto tiempo para realizar las tareas correspondientes. En estos casos se usó una técnica llamada Low Power Listening (LPL) encargada de definir los ciclos de trabajo pudiendo elegir diferentes tiempos para despertar las motas.

Tabla 4. Consumo de energía de las motas IRIS y Mica2.

Operating Current (2.7-3.3V)	IRIS	MICA2
Processor, full operation	8mA (7.37 MHz)	12mA (7.37 MHz)
Processor, sleep	8µA	10µA
Radio, receive	16mA	7mA
Radio, transmit (1 mW power)	17mA	10mA
Radio, sleep	1µA	1µA

En la Tabla 4 se presentan los diferentes consumos de las motas IRIS y Mica2 cuando están full operation y cuando están dormidas.

Otras técnicas usadas para disminuir el consumo energético son las técnicas de harvesting. Estas técnicas consisten en la recolección y el aprovechamiento de la energía presente y distribuida en el ambiente, proveniente de diversas fuentes: luz, radio, calor, vibración, presión, movimiento, etc. mediante dispositivos tales como paneles fotovoltaicos, antenas, elementos piezoeléctricos y termoeléctricos, inductores, celdas electroquímicas, etc.

En las iglesias para la estación meteorológica en el exterior se usó una célula fotovoltaica para alimentar la mota Waspnote de Libelium.

### 4.3. Protocolos de enrutamiento

Se realizaron varias pruebas en las iglesias y en ITEFI usando las mismas redes, pero distintos protocolos de enrutamiento (estrella, árbol y malla). El protocolo tipo estrella es el que menos consume, pero todas las motas tienen que ver a la base. Mientras que el algoritmo tipo árbol es el que más consume. En cuanto a la pérdida de mensajes se observó que la pérdida de mensajes usando el protocolo tipo árbol era ligeramente menor que el tipo malla. Pero en el tipo árbol si una mota falla, se pierden todos los hijos, en cambio en tipo malla no ocurre eso ya que siempre hay varios caminos. También se observó que el protocolo tipo árbol es mucho más estable hay mucho menos cambios de padres de las motas que en la de tipo malla. Por lo tanto, dependiendo de la aplicación es mejor un protocolo u otro.

### 4.4. Propagación de señales de RF. Interferencias

A la hora de diseñar e instalar una red inalámbrica hay que tener en cuenta la problemática asociada en la propagación de las señales de RF. Hay que estudiar la atenuación o interferencia que sufren al tener que atravesar los diferentes materiales del edificio e interferencias ocasionales que se producen debido a la actividad humana. Vamos a exponer algunos ejemplos ilustrativos en las diferentes instalaciones que hemos realizado.

En los experimentos de medida de TH mediante tecnología IoT realizados en el ITEFI, se observó que en el sótano se producían pérdidas de las señales debido a que la mota estaba en una galería aislada y el router WiFi

en una habitación con una puerta metálica antiincendios.

En la monitorización remota de una de las iglesias, comprobamos a principios del mes de mayo que gran parte de la red estaba inhabilitada. El motivo era que se había instalado un gran altar a la Virgen lleno de flores que absorbían la señal de RF. A medida que fueron secándose la comunicación se reanudó.

En una de las instalaciones de las estructuras de madera cuya base se encontraba en el despacho de una universidad, la comunicación se cortaba cuando se producía el descanso entre clases. El motivo, obvio, los móviles de los estudiantes que se ponían todos a emitir. También se observaron pérdidas de mensajes en los cubos de madera dependientes de la meteorología. Afectando la lluvia y la humedad a la disminución de la señal de RF.

Tabla 5. Grado de interferencia de RF en diferentes materiales.

Material	Ejemplo	Interferencia
Madera	Tabiques	Baja
Vidrio	Ventanas	Baja
Amianto	Techo	Baja
Yeso	Paredes int.	Baja
Ladrillo	Paredes int./ext.	Media
Hojas	Árboles	Media
Agua	Lluvia / Niebla	Alta
Cerámica	Tejas	Alta
Papel	Rollo de papel	Alta
Vidrio -> plomo	Ventanas	Alta
Metal	Vigas / Armarios	Muy alta

#### 4.5. Pérdida de Mensajes

La pérdida de mensajes es una de las problemáticas más difícil de analizar. Ya que es difícil saber el motivo de esa pérdida. Ésta depende del protocolo de enrutamiento usado, del chip de radio y de otras circunstancias ajenas a la red.

En los experimentos realizados se observó que la pérdida de mensajes es mayor entre semana que los fines de semana debido a la circulación de personas. Además, como ya se dijo anteriormente, la pérdida de mensajes también depende de la estabilidad de los protocolos de enrutamiento. Cuando una mota cambia muchas veces de padre es más probable que algún mensaje se pierda.

En el caso de las motas Wapsmote de Libelium se observó que apenas perdían mensajes aún usando un protocolo tipo malla.

## 5. Conclusiones

En este trabajo se describen varias aplicaciones de monitorización de edificios o materiales de edificación realizadas por el grupo G-CARMA del ITEFI en colaboración con otros institutos, mediante el uso de redes inalámbricas de sensores. Para ello, se muestran 4 escenarios: Iglesias, cubos de madera, arquitectura de adobe y el edificio del ITEFI. En ellos se desarrollaron varios experimentos con diferentes objetivos. Con estas pruebas se pudo mostrar los inconvenientes encontrados como consumo energético, protocolos de enrutamiento, pérdida de mensajes, etc. A pesar de la problemática encontrada, la cual se vio que era de fácil solución, se puede concluir que estos sistemas son adecuados para la monitorización de diversos materiales y estructuras. Sólo es necesario elegir en cada caso el sistema adecuado según la aplicación a desarrollar.

## Agradecimientos

Los autores desean agradecer al Ministerio de Economía y Competitividad de España la concesión del proyecto BIA2016-77992-R (AEI / FEDER, UE) de la Convocatoria Retos Investigación; cofinanciados por la Unión Europea a través de fondos FEDER.

## Bibliografía

- (1) Martínez-Garrido, M.I., Aparicio, S., Fort, R., Anaya, J.J. e Izquierdo M.A.G. (2014). Effect of solar radiation and humidity on the inner core of walls in historic buildings, *Construction and Building Materials*, 51, 383-394.  
doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.10.068
- (2) Aparicio, S., Martínez-Garrido, M.I., Ranz, J., Fort, R., Izquierdo, M.Á.G. (2016). Routing Topologies of Wireless Sensor Networks for Health Monitoring of a Cultural Heritage Site. *Sensors*, 16, 1732.  
doi: 10.3390/s16101732
- (3) Aparicio, S., Galván, J., Hernández, M.G., Fernández-Golfín J.I., Anaya, J.J. (2016). A wireless system for monitoring the internal temperature and humidity values of different types of Wood. *Designing with bio-based building materials – Challenges and opportunities Congress. COST ACTION FP1303*, Madrid.
- (4) Mellado, M.A., Castilla, F.J., Oteiza, I. y Aparicio, S. (2020). Hygrothermal assessment of a traditional earthen wall in a dry Mediterranean climate. *Building Research & Information*, 1-13.  
doi:10.1080/09613218.2019.1709787
- (5) Aparicio, S., Ranz, J., Olivera, J., Martínez-Garrido, M.I., Hernández, M.G. (2014). Performance evaluation of wireless sensor networks for architectural heritage conservation. *The 11th International Conference ART14*, Madrid.



# Monitorización de Sistemas Constructivos, Edificios y Entornos Urbanos en la Unidad de I+D UiE3 del CIEMAT

Medida directa, indirecta e índices

UNIDAD DE I+D SOBRE EFICIENCIA ENERGÉTICA EN LA EDIFICACIÓN (UiE3). CIEMAT

M.N. Sánchez (1), R. Olmedo (2), J.D. Guzmán (3), S. Soutullo (4), A. Castellanos (5), O. Seco (6),  
S. Castaño (7), D. Bravo (8), R. Enríquez (9), M.R. Heras (10), M.J. Jiménez (11)

- (1) Dr. Ingeniero Industrial. Unidad de I+D sobre Eficiencia Energética en la Edificación del CIEMAT, Madrid.
- (2) Ingeniero Técnico Industrial. Unidad de I+D sobre Eficiencia Energética en la Edificación del CIEMAT, Madrid.
- (3) Ingeniero Técnico de Telecomunicaciones. Unidad de I+D sobre Eficiencia Energética en la Edificación del CIEMAT, Madrid.
- (4,10,11) Dra. CC. Físicas. Unidad de I+D sobre Eficiencia Energética en la Edificación del CIEMAT, Madrid.
- (5) Ingeniero Industrial. Unidad de I+D sobre Eficiencia Energética en la Edificación del CIEMAT, Madrid.
- (6) Dr. CC. Químicas. Unidad de I+D sobre Eficiencia Energética en la Edificación del CIEMAT, Madrid.
- (7) Ayudante de Investigación. Unidad de I+D sobre Eficiencia Energética en la Edificación del CIEMAT, Madrid.
- (8) Ingeniero Técnico Informático. Unidad de I+D sobre Eficiencia Energética en la Edificación del CIEMAT, Madrid.
- (9) Dr. CC. Físicas. Hasta julio de 2018: Unidad de I+D sobre Eficiencia Energética en la Edificación del CIEMAT, Madrid.

Persona de contacto/Corresponding author: [nuria.sanchez@ciemat.es](mailto:nuria.sanchez@ciemat.es) (M.N. Sánchez)

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0704-2989> (M.N. Sánchez); <http://orcid.org/0000-0002-7803-2278> (R. Olmedo); <http://orcid.org/0000-0001-6420-2734> (S. Soutullo); <http://orcid.org/0000-0003-4571-769X> (S. Castaño); <http://orcid.org/0000-0001-5753-9363> (R. Enríquez); <http://orcid.org/0000-0002-5441-5346> (M.J. Jimenez)

## Monitorización de Sistemas Constructivos, Edificios y Entornos Urbanos en la Unidad de I+D UiE3 del CIEMAT. Medida directa, indirecta e índices

### RESUMEN

El análisis del comportamiento energético de los edificios y de las áreas urbanas se puede realizar de manera experimental mediante la monitorización. Existen múltiples opciones de sensores y sistemas de adquisición de datos disponibles en el mercado, debiendo seleccionarse la solución más efectiva en cada caso durante la fase del diseño de la campaña experimental. La Unidad de Eficiencia Energética en la Edificación del CIEMAT tiene una larga experiencia a la hora de realizar y analizar este tipo de evaluaciones energéticas. En este documento, se resumen algunas consideraciones generales y criterios de instalación de los sensores para todo tipo de monitorización. Asimismo, se detallan las monitorizaciones realizadas por la unidad más recientemente o que presentan alguna singularidad. En los diferentes escenarios de medida se identifican las variables que fueron registradas y el período experimental seleccionado. Finalmente, se hace referencia a medidas indirectas e indicadores relevantes en la caracterización energética experimental.

**Palabras clave:** monitorización; sensores; comportamiento energético; edificación; entorno urbano; ensayos in-situ

## *Monitoring of Building Systems, Buildings and Urban Environments at the UiE3 CIEMAT's R&D Unit: Direct, indirect measurement and indices*

### ABSTRACT

*The analysis of the energy performance of buildings and urban areas can be carried out experimentally through monitoring. There are multiple options of sensors and data acquisition systems available in the market, and the most effective solution must be selected in each case during the design phase of the experimental campaign. The CIEMAT Energy Efficiency in Building Unit has a long experience in carrying out and analyzing this type of energy evaluation. This document summarizes some general considerations and criteria for installing the sensors for all types of monitoring. Likewise, the monitoring carried out by the unit most recently or with any singularity is detailed. In the different measurement scenarios, the variables that were registered and the selected experimental period are identified. Finally, indirect measures and relevant indicators in the experimental energy characterization are described.*

**Keywords:** *monitoring; sensors; energy performance; building; urban environment; in-situ tests*

## 1. Introducción

La Unidad de I+D sobre Eficiencia Energética en la Edificación (UiE3) del CIEMAT desarrolla proyectos de I+D desde 1986, incorporando campañas de monitorización energética de edificios y de entornos urbanos. En este contexto, se han desarrollado y aplicado metodologías de medida y análisis de datos experimentales para la evaluación experimental de sistemas constructivos, edificios construidos en condiciones reales de uso, y entornos urbanos. Estos proyectos se han desarrollado en colaboración con empresas y otros centros de investigación nacionales e internacionales, y han sido financiados por la Unión Europea, el Ministerio de Ciencia e Innovación, y diferentes Comunidades Autónomas y Ayuntamientos. Estos proyectos se especifican en los artículos de la UiE3 del CIEMAT en este libro sobre recintos, edificios y entornos urbanos. A continuación, se citan los proyectos más destacados en los que se han desarrollado estos trabajos de monitorización:

- Proyecto ECO-VALLE. 2003.2004. Mediterranean Verandahways - Ensanche de Vallecas. Convocatoria LIFE - 2002 Medio Ambiente “Ordenación y Desarrollo del uso del Territorio. Unión Europea.
- Proyecto PSE-ARFRISOL (PS-120000-2005-1). 2005-2012. Proyecto tecnológico singular y de carácter estratégico sobre arquitectura bioclimática y frío solar. Convocatoria: Proyectos singulares estratégicos, Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades.
- Programa OMEGA-CM (S2013/MAE2835). 2014-2018. Medidas de calidad y no intrusivas para la evaluación y optimización energética de edificios existentes con elementos constructivos avanzados. Convocatoria Tecnologías 2013, de la Comunidad de Madrid.
- Proyecto Energysis (RTC-2016-5306-3). 2016-2019. Desarrollo de un sistema transportable de isla energética para estructuras modulares de baja demanda y alta eficiencia. Convocatoria Retos de Colaboración 2016, del Ministerio de Economía, Industria y Competitividad.
- Proyecto Annex 58 (2011-2016, Reliable Building Energy Performance Characterisation based on

Full Scale Dynamic Measurements) y Annex 71 (2016-2021. Building energy performance assessment based on in-situ measurements) del “Programa Energy in Buildings and Communities (EBC)” de la Agencia internacional de la energía (IEA).

## 2. Medida directa de las variables

### 2.1. Consideraciones generales

Los trabajos experimentales de investigación desarrollados en el CIEMAT tienen como uno de sus objetivos que las medidas experimentales sean fiables, reduciendo la intrusividad y el coste de los dispositivos experimentales empleados en estas monitorizaciones. El CIEMAT dispone además de instalaciones experimentales de referencia que incluyen sistemas de monitorización con alto nivel de instrumentación, que permiten analizar y contrastar otras alternativas simplificadas más económicas y menos intrusivas (1, 2).

En este contexto se consideran los siguientes aspectos para alcanzar los niveles de calidad necesarios:

- Exactitud de los transductores que incorporan los diferentes dispositivos de medida.
- En el marco de algunas investigaciones científicas se monitoriza con redundancia en la medida de las principales magnitudes físicas.
- Ubicación y distribución (si es necesario), de los elementos sensores, de los elementos de protección y de los accesorios, para una representación adecuada del mensurando.
- Relevancia del sistema de adquisición de datos: Resolución del conversor analógico-digital (normalmente al menos 16bits), rango de medida acorde al rango de la salida de los sensores, y sistemas modulares para aportar flexibilidad según evolucionen las necesidades del proyecto, con un diseño de la instalación distribuido para minimizar la longitud del cableado y en consecuencia las incertidumbres que éste pueda introducir en las medidas. Los sistemas de adquisición de datos se ubicarán cerca del área de medida para minimizar la longitud de los cables que transmiten la señal analógica, en caso de utilizarse.

- Cableado: pares trenzados y apantallados con puesta a tierra para minimizar el ruido eléctrico evitando las perturbaciones en la transmisión de la señal de medida. Además, se aconseja identificar los extremos de cada cable para evitar errores de interconexión, y utilizar diferentes pares de colores para cada tipo de señal, manteniendo este código de color en toda la instalación. Evitar la unión de cables en la medida de lo posible. Cuando esto no se puede evitar, la soldadura se envuelve con material termorretráctil. Además, los extremos del cable deben estar cubiertos con terminales de conexión para evitar ruidos por problemas de conexión defectuosos.
- Se aconseja evitar el uso de convertidores, porque introducen una fuente adicional de incertidumbre en la medida.
- Todos los valores de voltaje se miden mediante entradas diferenciales al datalogger.
- Las termorresistencias de platino, PT100, se miden directamente mediante conexiones a cuatro hilos, o en su defecto a tres hilos en los equipos que lo permitan.

## 2.2. Escenarios de medida

Se registran las variables en distintos escenarios. A continuación se resumen estas variables para cada escenario:

### 2.2.1 Exterior (medidas meteorológicas)

Las condiciones de contorno exterior son clave en el análisis del comportamiento energético de los edificios, ya que se ve afectado por las condiciones climáticas locales. La monitorización de las condiciones exteriores se realiza mediante la instalación de una estación meteorológica dotada con el equipamiento necesario para la medida de las variables climáticas más relevantes: temperatura y humedad relativa del aire, radiación solar global horizontal, radiación infrarroja y velocidad y dirección de viento.

### 2.2.2 Interior

El diseño e implementación de los sistemas de monitorización en el interior del edificio, junto con las condiciones exteriores, permitirán llevar a cabo la evaluación energética global del mismo. La obtención de medidas de alta calidad registradas durante la monitorización servirá además para apoyar actividades de investigación sobre confort térmico, la caracterización de

la envolvente y el análisis del comportamiento energético e integración de sistemas activos y pasivos en los edificios. La monitorización permite la identificación de las desviaciones entre las simulaciones del comportamiento de los edificios y las medidas experimentales. Se deben considerar todos los elementos de la cadena de medida. En primer lugar se define la duración de las campañas de monitorización en base al objetivo de la investigación, y considerando el patrón típico de uso del edificio.

Las campañas de monitorización de larga duración se realizan en condiciones reales de uso de los edificios con ocupación. En este caso, las condiciones interiores suelen estar dentro de los límites de confort. En estos períodos, los ocupantes son libres de usar el edificio y abrir y cerrar puertas y ventanas.

En otras investigaciones interesa la realización de campañas de monitorización más cortas con los edificios vacíos, correspondiendo con períodos de vacaciones generalmente de quince o treinta días. En estos períodos, es posible utilizar el sistema de calefacción y refrigeración así como otros sistemas más simples, como los calentadores eléctricos auxiliares, para generar secuencias de potencia y optimizar el análisis de los datos. Si es necesario, el edificio puede estar fuera de las bandas de confort en estos períodos.

Otro factor clave es definir los criterios de selección de los recintos a monitorizar, así como las variables y los puntos de medida. Teniendo en cuenta el tamaño estándar de los edificios, una monitorización detallada de cada habitación no suele ser asequible, y por tanto, deben seleccionarse algunas habitaciones según su representatividad en el edificio. Este criterio de selección debe basarse en el uso del edificio y de cada una de sus habitaciones, y en las características constructivas de éstas. Se debe instalar un conjunto completo de sensores para poder cuantificar todas las contribuciones al balance de energía en las habitaciones seleccionadas en ambos casos: edificio vacío y edificio en condiciones de ocupación. Además, se deben implementar medidas menos detalladas en las habitaciones adyacentes, en los pasillos y en las zonas comunes, para tener en cuenta las condiciones de contorno.

A continuación se debe seleccionar el sistema de adquisición de datos, su topología y los sensores e

instrumentación utilizada para la medida de cada una de las variables, y justificar su idoneidad, teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

- Los puntos de medida se identifican para cada caso particular de acuerdo con las características del edificio y el propósito de la monitorización, y en concordancia con la idea general que todas las magnitudes físicas que contribuyen al intercambio de calor en el sistema monitorizado deben cuantificarse.
- Además de los puntos de medida que se implementan para ajustarse a los requisitos de los análisis, se incluyen otros puntos de medida para verificaciones cualitativas, para verificar la calidad de las medidas, la validez de la hipótesis de simplificación, etc.
- Las condiciones de contorno no se controlan, por tanto, se realizan las siguientes medidas para cada habitación monitorizada: temperatura del aire en las habitaciones adyacentes, temperatura de la superficie del suelo, temperatura de la superficie del vidrio en las ventanas, condiciones asociadas con el funcionamiento de los sistemas de calefacción y refrigeración, y temperaturas bajo el suelo a diferentes niveles: a nivel del suelo y enterrado un metro.
- Los usuarios influyen en el comportamiento del edificio ya que las tasas de ventilación van a cambiar con la apertura y cierre de puertas y ventanas. Por lo tanto, se registra el estado de las mismas.
- Hay una contribución al balance de energía en la habitación debido a la actividad metabólica de los usuarios. Para profundizar en la medida y el modelado de los patrones de ocupación, se incluyen las siguientes medidas: concentración de CO<sub>2</sub>, humedad relativa, y consumo eléctrico de los ordenadores e iluminación.
- Para profundizar en la medida y modelado de las infiltraciones de aire, se incluyen las siguientes medidas: velocidad y dirección del viento en exteriores, concentración de CO<sub>2</sub> en interiores y exteriores. También se registra la posición de apertura o cierre de las puertas y de las ventanas.
- Otro de los efectos que en muchos casos requieren hipótesis especiales para lograr resultados satisfactorios es el intercambio de onda larga en las superficies internas calentadas por la radiación solar. En algunos trabajos se han utilizado herramientas avan-

zadas para el análisis dinámico y modelos no lineales para resolver tales problemas. Esta experiencia se ha aplicado en el análisis de otros sistemas como las chimeneas solares, que permiten un importante ahorro de energía en climas cálidos y soleados (3).

La información sobre la configuración del sistema de adquisición de datos y de los sensores utilizados se debe registrar en tablas que incluyan toda la información relevante para garantizar la trazabilidad de las medidas, la ubicación y la identificación de cada sensor y de los canales, el conexionado, las conversiones correspondientes de cada salida eléctrica a cantidades físicas, etc. Se genera una tabla que incluye toda esta información para cada uno de los módulos del sistema de adquisición de datos. Estas tablas se deben registrar junto con los archivos de datos. Además es importante registrar durante la monitorización toda la información crítica, los eventos y las observaciones que pueden ocurrir al sensor de medida, al sistema de adquisición de datos, en los límites de medida, etc.

El CIEMAT, en el marco del Proyecto ARFRISOL, realizó la monitorización de cinco Edificios Contenedores Demostradores de Investigación (C-Ddl's). Estos cinco edificios demostradores son instalaciones experimentales a escala real utilizadas regularmente como edificios de oficinas que están continuamente monitorizados (4, 5), y disponibles para futuros proyectos de investigación en el campo de la Eficiencia Energética en Edificios.

Basándose en estos datos experimentales registrados en condiciones reales de uso se realiza la evaluación energética global de estos edificios demostradores (Figura 1). Son oficinas de aproximadamente 1000m<sup>2</sup>, construidas y ubicadas en diferentes lugares representativos de los climas españoles.



Figura 1. Proyecto ARFRISOL: monitorización interior y exterior

Estos C-Ddl están diseñados para minimizar el consumo de energía mediante sistemas de climatización basados en tecnologías renovables, manteniendo niveles óptimos de confort. Los edificios incluyen estrategias pasivas de ahorro de energía basadas en el diseño arquitectónico y de construcción, tienen sistemas solares activos que abastecen la mayor parte de la demanda de energía (baja debido al diseño optimizado del edificio) y, por último, sistemas auxiliares convencionales para abastecer la muy baja demanda que no se puede suministrar con energía solar, utilizando en la medida de lo posible recursos de energía renovable como la biomasa.

### 2.2.3 Sistemas constructivos específicos

#### A) Fachada ventilada.

La fachada sur del Edificio CIESOL, que es uno de los edificios monitorizados en el Proyecto ARFRISOL, tiene una fachada ventilada. En esta fachada se instalaron sensores específicos para profundizar en el estudio de este tipo de soluciones constructivas (6, 7). Se trata de un componente singular construido para mejorar el comportamiento térmico del edificio, y de funcionamiento complejo. En este sistema se integraron unos dispositivos que permiten la medida de temperatura y de densidad de flujo térmico en diferentes planos, y a diferentes alturas, de velocidad de aire en el interior de la cavidad a diferentes alturas, de radiación global e infrarroja sobre la superficie exterior de la fachada, y de velocidad y dirección de viento frente y próximas a la fachada. También se dispone de un conjunto de sensores de temperatura distribuidos en el interior de la cavidad.

#### B) Chimeneas solares.

El CIEMAT dispone de un prototipo de chimenea solar de tamaño real, construido en 2003, y monitorizado desde su construcción en condiciones climáticas reales. Se han realizado múltiples experimentos de modelado empírico y de validación de modelos teóricos (8-9).

La Figura 3 muestra la Chimenea Solar y los dispositivos de medida instalados. Las medidas de temperatura se realizan mediante termopares tipo T previamente calibrados. La medida de velocidad de aire en el canal se realiza mediante nueve anemómetros de hilo caliente. El sistema también incorpora medidas locales de radiación global y radiación de onda larga sobre el plano de la superficie acristalada de la chimenea, y un anemómetro

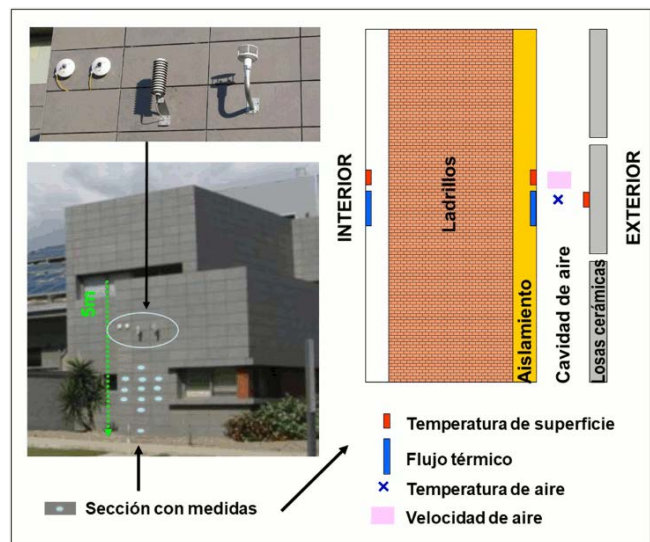


Figura 2. Fachada ventilada en el edificio CIESOL

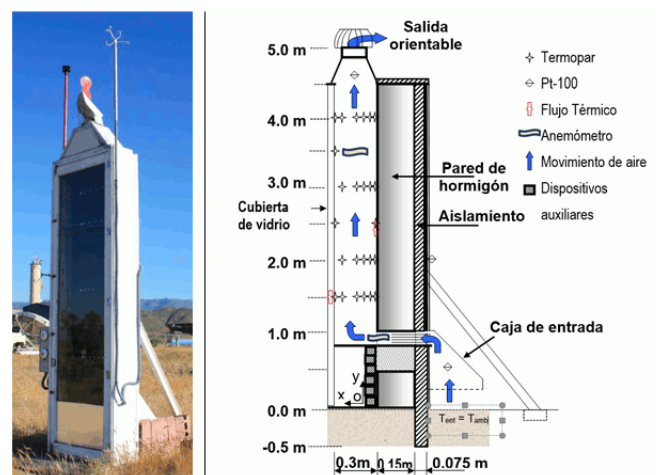


Figura 3. Chimenea Solar. Detalle monitorización (10)

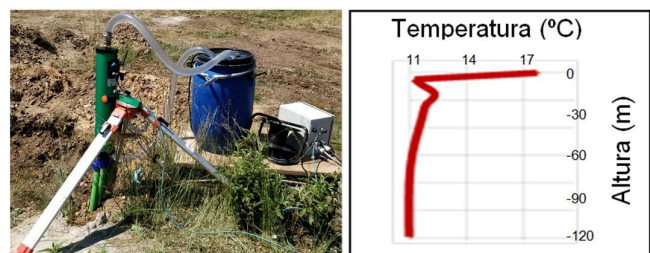


Figura 4. Sistema portátil de medida en sistemas geotérmicos

dos metros por encima de la salida del aire. Adicionalmente, se cuenta con las medidas de las variables meteorológicas que se miden y registran mediante la estación meteorológica del LECE próxima a la Chimenea Solar (2). Todas las medidas se registran cada minuto.

### C) Tubos enterrados.

El CIEMAT ha instalado en el CEDER (Soria) una bomba de calor geotérmica compuesta por tres circuitos principales: captación, refrigerante y producción, mediante los que se transporta energía térmica entre el terreno y los puntos de consumo. Se dispone de un sistema portátil de análisis del comportamiento del terreno en las perforaciones geotérmicas. El dispositivo bombea un caudal de agua en los tubos enterrados, introduciéndose los sensores de temperatura. El agua desplaza el sensor a lo largo de la tubería registrando el valor de la temperatura y de la localización del sensor en el intervalo de tiempo fijado previamente. De esta forma, se puede medir la variación de la temperatura con la profundidad en el terreno, la cual variará en función de las características de la composición del terreno, y con la presencia o no de balsas de agua.

En la Figura 4 se muestra el sistema de medida portátil y una gráfica de la caracterización del terreno en el que se muestra la evolución de la temperatura del terreno frente a la profundidad.

### 2.2.4 Distrito

#### A) Isla Energética con autoabastecimiento mediante una microrred híbrida.

Se ha desarrollado un sistema transportable e innovador de alta eficiencia que funciona como isla energética de producción y consumo en el marco del proyecto ENERGYSIS (Figura 5). La instalación se compone de un sistema de edificación con estructuras modulares ligeras e hiperligeras de baja demanda. Estos elementos modulares son aptos para intervenciones rápidas de emergencia, y en áreas sin infraestructura, o de difícil acceso. Permiten una sencilla gestión de los recursos y de la energía eléctrica, de la climatización y del ACS. El suministro energético se realiza mediante generación renovable, tanto térmica como eléctrica, y sistemas de cogeneración.

Se utiliza un único sistema distribuido de adquisición de datos para la monitorización y el control. El datalogger principal, con capacidad para 420 canales de entrada

de datos y 500 canales de comunicación, gestiona la medida y el control de los sistemas de generación y cogeneración de los dos anillos térmicos de la red. Ésta, se complementa con tres datalogger adicionales de 100 canales de entrada. Dos de ellos se utilizan para la adquisición de las variables ambientales de los dos módulos habitacionales, y el tercero para la ampliación de los sistemas.

Los distintos componentes de la red se comunican mediante protocolo modbus TCP/IP bajo red Lan. Los datos adquiridos se almacenan en local en los propios datalogger. Por otro lado, el sistema completo se monitoriza y se controla permanentemente a través de su servidor web, y con un software scada se automatiza la descarga de datos. Se está implementando un pequeño sistema de control de válvulas.

Los sensores de entrada de datos son:

- Sensores de temperatura PT100 a cuatro hilos clase 1/10DIN en distintos formatos: encapsulados en silicona para superficie, en caja para ambiente y en sonda para tuberías.
- Sensor capacitivo de humedad relativa con precisión  $\pm 2\%$ .
- Caudalímetros: másico de efecto Coriolis con error  $\pm 0,15\%$ , de turbina con error  $\pm 1\%$  y electromagnéticos con error  $\pm 0,3\%$ .
- Transductores eléctricos 0.15% (U, I) y 0.2% (P, Q, S) 0.5S

Además, se registran medidas de la radiación solar y de la velocidad y dirección de viento en distintas estaciones meteorológicas. Los datos adquiridos permiten analizar térmicamente los edificios estudiados en el proyecto, y analizar las mejoras en el rendimiento global de la microrred mediante la hibridación de tecnologías de sistemas de generación y cogeneración, y la aplicación de algoritmos inteligentes.



Figura 5. Vista aérea de la Isla Energética

Como antecedente a este proyecto, se monitorizó un hangar con cubierta textil dotado de sistemas de suelo radiante, tanto para calefactar como para refrigerar mediante energía geotérmica y aerotérmica. Además se midieron datos de temperatura y de humedad relativa en el interior del hangar para estudiar la estratificación de la temperatura del aire, y comprobar las necesidades energéticas para alcanzar las condiciones de confort en las áreas de trabajo.

### B) Árboles de Aire

En el marco del proyecto LIFE 'ECO-Valle Mediterranean Verandahways' el CIEMAT llevó a cabo la monitorización en un entorno urbano de nuevo desarrollo en el distrito de Vallecas en Madrid. El proyecto fue coordinado por la Empresa Municipal de la Vivienda y Suelo de Madrid. Se construyeron tres estructuras cilíndricas instaladas de sur a norte en el eje principal del bulevar llamadas 'Árboles de Aire'. Se diseñaron con diferentes objetivos: multimedia, zona infantil y zona con torres de viento evaporativas.



Figura 6. Árbol Evaporativo y detalle de la monitorización

Además de la monitorización intensiva del 'Árbol de Aire' evaporativo, una estación meteorológica instalada en un edificio cercano del bulevar registró los valores de clima (11).

Se diseñaron cuatro escenarios de monitorización:

Escenario 1: medida del clima en la azotea de un edificio cercano al árbol de aire. La estación meteorológica estaba compuesta por: PT-100 para medir la temperatura (rango:  $-50^{\circ}\text{C}$  a  $50^{\circ}\text{C}$ , precisión:  $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ ), dispositivos capacitivos para medir la humedad relativa (rango: 0 a 100%, precisión:  $\pm 2\%$ ), anemómetro y veleta para medir la velocidad (rango: 0 a 50 m/s, precisión:  $\pm 0.5\text{m/s}$ ) y dirección del viento (rango:  $0^{\circ}$  a  $360^{\circ}$

mecánicos, precisión:  $\pm 5^{\circ}$ ). y un piranómetro para medir la radiación solar (rango: 0 a  $4000\text{ W/m}^2$ , sensibilidad:  $17\ \mu\text{V/Wm}^2$ , precisión:  $\pm 2\%$ ).

Escenario 2: se registró la temperatura y la humedad en la parte superior de dos farolas (4m) próximas al cilindro norte. Se usaron resistencias PT-100 y sensores capacitivos.

Escenario 3: se instalaron sensores de temperatura, humedad, velocidad y dirección del viento en diferentes posiciones (norte, sur y central) y a diferentes alturas (10.7, 7.6 y 4.5m). Se instalaron PT-100, dispositivos capacitivos y anemómetros ultrasónicos biaxiales (velocidad: rango de 0 a 30 m/s y precisión:  $\pm 2\%$ ; dirección: rango de  $0^{\circ}$  a  $359^{\circ}$  y precisión  $\pm 3\%$ ). Y se instalaron PT-100 protegidas en el interior de la estructura a 1 m de altura (soporte de fijación norte, sur, este y oeste) para medir la temperatura en la zona peatonal.

Escenario 4: se registraron los valores de temperatura, humedad y viento a distintas alturas en el interior de una de las dieciséis torres evaporativas. Se instalaron dos PT-100 a la entrada y a la salida de la torre, dos anemómetros ultrasónicos biaxiales a la entrada y a la salida de la torre, cinco PT100 (rango:  $-50^{\circ}\text{C}$  a  $50^{\circ}\text{C}$ , precisión:  $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ ) a distintas alturas en el interior de la torre, y dos equipos inalámbricos con tecnología de radio para medir temperatura y humedad a la entrada y a la salida de la torre (temperatura: rango de 0 a  $55^{\circ}\text{C}$  y precisión  $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ , humedad: rango de 10 a 95% y precisión  $\pm 5\%$ ). Estos sensores inalámbricos, con protección IP64, se instalaron para evitar los problemas de condensación de los equipos de temperatura de bulbo seco en presencia de agua. Todos los sensores fueron previamente calibrados y elegidos de forma que la incertidumbre en las medidas fuera inferior al 3%. Se utilizó un datalogger autónomo para registrar las medidas no inalámbricas. Las medidas de temperatura y de humedad se registraron cada diez minutos, mientras que las condiciones del viento se registraron cada minuto.

Estos cuatro escenarios proporcionaron resultados higró-termodinámicos que permitieron cuantificar la eficiencia del 'Árbol' evaporativo y calcular el confort térmico alcanzado en la zona peatonal bajo dicha estructura.



### 2.3. Dispositivos sensores y criterios de instalación

En esta sección se consideran los sensores habitualmente utilizados para la medida de las diferentes variables, así como los requisitos de integración y de protección que requiere la correcta representación del mensurando.

- Temperatura del aire: termorresistencia de platino, PT100, 1/10 DIN, medida directamente mediante una conexión a cuatro hilos, con una carcasa protectora de la radiación solar y ventilada para medidas en exteriores.
- Temperatura de superficie: sensores y conexiones análogos a los utilizados para la temperatura del aire, posicionados para asegurar un buen contacto del sensor con la superficie cuya temperatura se quiere medir. Para ello el sensor se incrusta entre dos láminas de poliamida de 0.05 mm de espesor. Debido a su construcción muy delgada, es muy flexible y tiene una masa muy pequeña, por lo que puede integrarse en la superficie medida minimizando la perturbación debido a su presencia.
- Temperatura del suelo: sensores y conexiones análogos a los utilizados en la temperatura del aire, en este caso con un sensor protegido de forma más robusta generalmente con encapsulado de silicona.
- Temperatura del agua en las tuberías: sensores y conexiones análogas a las utilizadas en la temperatura del aire. En este caso, para garantizar una buena instalación del sensor se deben modificar las tuberías para insertar las sondas, utilizar un material de alta conductividad térmica que garantice un buen contacto entre los sensores y las tuberías, y la protección mediante un buen aislamiento externo que evite las perturbaciones debido a las fuentes o los sumideros de calor próximos.
- Radiación solar global. Medida con piranómetro estándar secundario según ISO 9060: 1990, con salida de voltaje y medida directa con conexión diferencial.
- Radiación de onda larga. Medida con un pirgeómetro con una sensibilidad de 5 a 15  $\mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$ , la salida en voltaje se mide directamente usando una conexión diferencial. Incorpora un sensor PT100 para medir la temperatura de la carcasa, que se mide directamente mediante una conexión a cuatro hilos.
- Humedad relativa exterior: Se suelen utilizar sensores combinados que incluyen además del sensor capacitivo de humedad (precisión de  $\pm 1\%$  a  $23^\circ\text{C}$ ) un sensor de temperatura de aire de tipo PT100, y con carcasa protectora frente a la radiación que permite la ventilación del sensor. Las salidas de voltaje se miden directamente usando conexiones diferenciales. La salida de corriente se puede utilizar alternativamente.
- Sensor de viento: se pueden utilizar sensores de tipo cazoletas o sensores de viento ultrasónico de dos ejes. Este último proporciona datos de velocidad y dirección del viento a través de dos salidas analógicas, con una precisión de  $\pm 2\%$  en la velocidad del viento y de  $\pm 3^\circ$  en la dirección del viento. Las salidas de 4..20 mA se miden directamente.
- Humedad relativa interior: sensor capacitivo con una precisión de  $\pm 2\%$ , salida de 4..20 mA y medida directa.
- Concentración de  $\text{CO}_2$ : transmisor de dióxido de carbono con una precisión de  $\pm 2\%$  del rango + 2% de lectura, y salida de 4..20 mA medida directamente.
- Densidad de flujo de calor: Su apariencia es la de una oblea de dimensiones 80 mm de diámetro y 5 mm de espesor. Tiene una termopila incrustada en su parte central en un material plástico negro. La conductividad térmica del material plástico es de 0.25W/mK, la precisión del coeficiente de sensibilidad es del 5%, y salida de voltaje medida directamente por conexión diferencial. Se usa la conversión de señal a 4..20mA, si la distancia es demasiado larga.
- Caudal de agua: medidor de flujo de tipo vortex con precisión  $\pm 2.5\%$  del rango, y salida de 4..20 mA medida directamente.
- Consumo de energía eléctrica: Vatímetro de clase 0.25 según la norma IEC 688: 1992, y salida de 4.20mA medida directamente.
- Detectar si las puertas y las ventanas están cerradas o no mediante interruptores magnéticos mecánicos.

### 3. Otros indicadores relevantes

En esta sección se consideran diferentes medidas indirectas e índices que se determinan de forma experimental a partir de datos registrados durante las campañas de monitorización, y que son importantes en los diferentes ámbitos de aplicación de la monitorización.

#### 3.1. Patrones de ocupación

El perfil de ocupación en recintos junto con la energía aportada a un edificio debido a la actividad metabólica, se han identificado como variables muy relevantes para la evaluación experimental de edificios y las aplicaciones de control. Es muy difícil estimar con exactitud la contribución al balance energético de los espacios ocupados, debida a la actividad metabólica. Las aproximaciones tradicionales para estimar estas contribuciones aportan altas incertidumbres a los modelos y a los resultados finales. Las medidas en continuo de concentración de CO<sub>2</sub> y de consumo eléctrico de los ordenadores, se han evaluado como indicadores alternativos del nivel de ocupación. Se concluyó que éstas últimas proporcionan mayor exactitud (12). Los patrones de ocupación obtenidos mediante la metodología propuesta se han incluido en el conjunto de variables de entrada empleadas para la caracterización energética experimental de los edificios en condiciones reales de uso (13, 14). Los resultados obtenidos mejoran al incluir esta variable. Este trabajo se ha realizado en el Programa OMEGA-CM.

#### 3.2. Índice de renovaciones

Es relevante y complejo determinar con exactitud el índice de renovaciones ya que tiene una variabilidad importante, y puede introducir una contribución relevante en los cálculos energéticos que consideran constante este parámetro (15). Por tanto, junto con el patrón de ocupación, es una variable clave en la caracterización del comportamiento del edificio. Su estimación experimental mediante técnicas tradicionales es compleja, intrusiva, y a veces poco precisa. Se han llevado a cabo diversos estudios para maximizar la exactitud en esta estimación experimental, minimizando el coste y la intrusividad. Inicialmente se propuso un procedimiento basado en la medida de la evolución del CO<sub>2</sub> metabólico (16) para determinar las renovaciones de aire en

recintos. Posteriormente se analizó la desviación entre estos resultados y la medida tradicional de referencia realizada utilizando N<sub>2</sub>O como gas traza, muy intrusiva y cara. También se analizó la posibilidad de expresar el índice de renovaciones como función de otras variables ambientales y meteorológicas (17). El estudio se realizó para recintos con ventilación mecánica sin activar y activada, concluyéndose lo siguiente: a) Ventilación mecánica sin activar: el acuerdo entre la medida de referencia y la medida alternativa es mejor cuanto mayor es la concentración inicial de CO<sub>2</sub>. Se identificó una correlación relevante entre el índice de renovaciones y la velocidad de viento. b) Ventilación mecánica: se detectaron discrepancias relevantes entre la medida de referencia y la medida alternativa. No se identificó ninguna correlación significativa entre el índice de renovaciones y las variables climáticas consideradas. En ambos casos el índice de renovaciones tiene una variabilidad importante que puede introducir una contribución relevante en los cálculos energéticos que consideran constante este parámetro. Este trabajo se ha realizado en el Programa OMEGA-CM.

#### 3.3. Caracterización fluido-dinámica.

EL CIEMAT dispone de un laboratorio de fluido-dinámica dotado con un sistema de medida denominado PIV (Velocimetría de Imágenes de partículas). Basado en la aplicación de la tecnología láser, permite la visualización cuantitativa del movimiento de un fluido (Figura 7). Esta técnica se basa en el análisis de una serie de pares de imágenes de un plano del campo fluido, adquiridas con una frecuencia y con un tiempo de exposición fijados previamente. Es una técnica no intrusiva y de medición indirecta, ya que la velocidad del fluido se infiere a partir del cálculo del desplazamiento de las partículas trazadoras inyectadas en él.

Se han llevado a cabo diversos experimentos para la caracterización térmica y fluido-dinámica de dos modelos de fachada ventilada. Se utilizó la técnica experimental PIV para la determinación de la velocidad del flujo de aire en el interior de la cámara ventilada de la fachada (Figura 8). Uno de los modelos es una fachada ventilada con junta horizontal abierta y vertical sellada (18), el otro es un modelo de fachada ventilada con junta horizontal y junta vertical abiertas (19). Ambos

modelos se han diseñado y construido basándose en las características reales de este tipo de sistemas. La simulación del efecto de la radiación solar incidente en la fachada se consigue mediante la utilización de unas esteras calefactoras que aplican un flujo de calor constante a las plaquetas. El comportamiento de las fachadas se evaluó en diferentes condiciones térmicas de radiación solar incidente en la fachada, considerando el efecto del viento exterior despreciable (20-22).

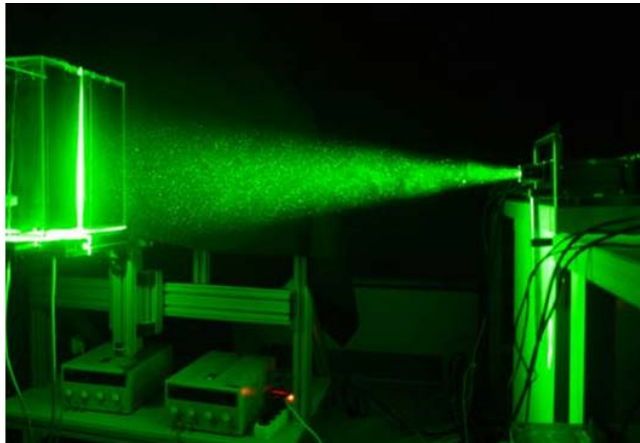


Figura 7. Laboratorio PIV

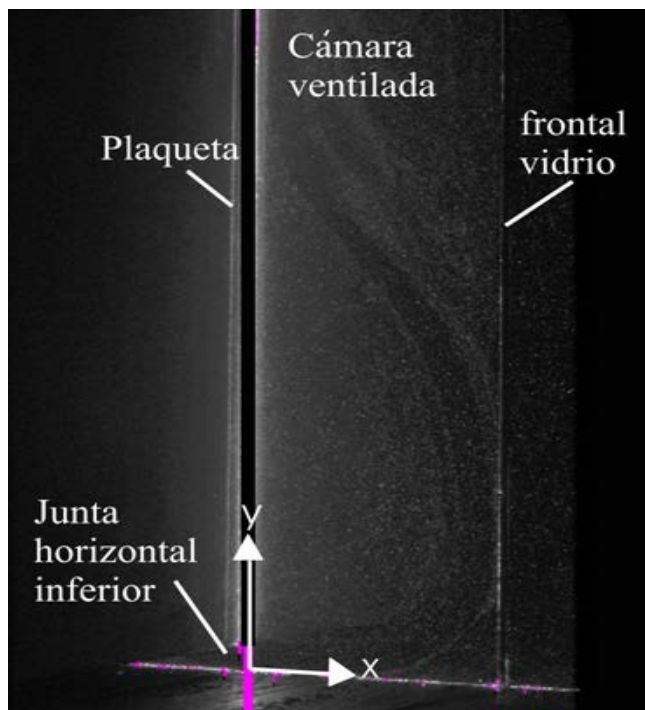


Figura 8. Cámara ventilada

Además se monitorizan diversas medidas de temperatura: la temperatura del aire en el interior de la cámara ventilada y la temperatura superficial en el centro de las plaquetas. Ambas se registran simultáneamente a la realización de los ensayos experimentales con PIV. Adicionalmente se utiliza la técnica de termografía infrarroja para la determinación de las temperaturas superficiales en las plaquetas y en la pared interior. Esta medida se realiza en las mismas condiciones térmicas existentes durante la monitorización.

### 3.4. Reflectancia del terreno

La estimación fiable de la reflectancia del terreno es relevante en los balances de energía donde interviene la radiación solar. A pesar de que existen métodos para obtenerla de forma directa, todavía es difícil en áreas urbanas donde es poco habitual disponer de medidas de la componente de la radiación solar reflejada por el terreno. Sin embargo, es posible utilizar los datos de radiación de estaciones meteorológicas convencionales para obtener la reflectancia del terreno a nivel local. Para ello se ha propuesto un método para obtener la reflectancia del terreno a partir de la medida de la radiación global en varias orientaciones (23). El método permite obtener la reflectancia del terreno a partir de las medidas de radiación global que están disponibles habitualmente en las instalaciones de producción de energía.

Este parámetro se ha obtenido a partir de las medidas aplicando entre otras hipótesis la isotropía y utilizando correlaciones de difusa (problema inverso). Se ha demostrado que la técnica inversa puede resolver el problema a partir de dos semanas de medidas de la radiación global horizontal y vertical. El análisis se realiza a partir de los datos medidos con varios piranómetros instalados en la cubierta del edificio ARFRISOL en la PSA (1) y en el LECE (2). Los resultados se han validado mediante las medidas realizadas con un albedómetro.

### 3.5. Calidad de aire

El Proyecto ARFRISOL contempló el análisis de la calidad de aire en el interior de los edificios bioclimáticos con el objetivo final de vigilar la salubridad del ocupante (24). Se han utilizado los sistemas de GS automático (cromatógrafo de gases masas al que se le acopla el ATD), un cromatógrafo de gases portátil equipado con

un detector de fotoionización (PID), y la Adsorción activa sobre el absorbente químico Tenax-TA seguida de una desorción térmica y un análisis cromatográfico (ATD). Con estos sistemas (Figura 9), comúnmente utilizados, se ha podido determinar qué contaminantes son los existentes en el interior de las edificaciones, como los COVs (componentes orgánicos volátiles) y otros elementos inorgánicos en forma de partículas, que son igualmente nocivos para el ocupante. La mejora en los sistemas de medida es necesaria a la hora de poder cuantificar in-situ la abundancia de los contaminantes encontrados. Se ha utilizado un sistema basado en la tecnología por espectroscopia de infrarrojos por transformada de Fourier (FTIR), usando y validando un prototipo de analizador portable (Figura 10), el cual ha aportado conclusiones cuantificables sobre los contaminantes encontrados que afianzan más aun la buena calidad del aire de los edificios bioclimáticos gracias a sus renovaciones de aire así como al control del aire que entra.



Figura 9. Sistema GC portátil



Figura 10. Equipo FITR

## 4. Bibliografía

- (1) R. Olmedo, M.N. Sánchez, R. Enríquez, M.J. Jiménez, M.R. Heras. 2016. ARFRISOL Buildings-UIE3-CIEMAT. Chapter of Report of Subtask 1a: Inventory of full scale test facilities for evaluation of building energy performances. (Editor: A. Janssens). IEA EBC Annex 58 Final Reports. ISBN: 9789460189906, Published by KU Leuven, Belgium.
- (2) S. Castaño, J.D. Guzmán, M.J. Jiménez, M.R. Heras. 2016. LECE-UiE3-CIEMAT. Chapter of Report of Subtask 1a: Inventory of full scale test facilities for evaluation of building energy performances. (Editor: A. Janssens). IEA EBC Annex 58 Final Reports. ISBN: 9789460189906, Published by KU Leuven, Belgium.
- (3) M.J. Jiménez, J. Arce, J.D. Guzmán, M.R. Heras. 2007. Estimation of the main thermal parameters of a real size solar chimney from outdoor dynamic tests. 2nd PALENC & 28th AIVC Conference. Greece. ISBN: 978-960-6746-02-4;978-960-6746-03-1.
- (4) M.J. Jiménez, R. Enríquez, R. Olmedo, N. Sánchez, M.R. Heras. 2010. Monitorización energética de los C-Ddls del PSE-ARFRISOL. Diseño experimental. I Congreso sobre Arquitectura Bioclimática y Frío Solar. Spain. ISBN: 978-84-693-5141-3.
- (5) J.A. Ferre, M. Pasamontes, M. Castilla, D. Bravo, N. Sánchez, M. Berenguel, M.J. Jiménez, M. Pérez. 2010. Desarrollo de un sistema de monitorización y control para edificios bioclimáticos en el marco del proyecto ARFRISOL. I Congreso sobre Arquitectura Bioclimática y Frío Solar. Spain. ISBN: 978-84-693-5141-3.
- (6) E. Giancola, M.N. Sánchez, M. Friedrich, O. Kalyanova Larsen, A. Nocente, S. Avesani, F. Babich, F. Goia. 2018. Possibilities and challenges of different experimental techniques for airflow characterisation in the air cavities of façades. *Journal of Facade Design & Engineering* 6(3), pp. 34-48.
- (7) E. Giancola, C. Sanjuan, E. Blanco, M.R. Heras. 2012. Experimental assessment and modelling of the performance of an open joint ventilated façade during actual operating conditions in mediterranean climate. *Energy and Buildings* 54, pp. 363-375.
- (8) J. Arce, M.J. Jiménez, J.D. Guzmán, M.R. Heras, G. Alvarez, J. Xaman. 2009. Experimental study for natural ventilation on a solar Chimney. *Renewable Energy*. 34(12), pp. 2928-2934.
- (9) J. Xamán, R. Vargas-López, M. Gijón-Rivera, I. Zavala-Guillén, M.J. Jiménez, J. Arce. 2019. Transient Thermal Analysis of a Solar Chimney for Buildings with Three Different Types of Absorbing Materials: Copper plate / PMC / Concrete wall. *Renewable Energy* 136, pp. 139-158.
- (10) J. Arce, M.J. Jiménez, R. Enríquez, J. Xamán, S. Castaño, G. Álvarez, M.R. Heras. 2015. Thermal performance analysis of a solar chimney, based on the experimental study of the main driving variables in a physical prototype. 36th AIVC conference. Effective ventilation in high performance buildings. Spain. ISBN: 2-930471-45-X.
- (11) Soutullo, S. (2015). Caracterización energética de una torre de viento evaporativa en un entorno urbano. Modelado del sistema para cuantificar el acondicionamiento térmico del lugar. Ediciones CIEMAT. ISBN: 978-84-7834-752-0.
- (12) J.A. Díaz, M.J. Jiménez. 2017. Experimental assessment of room occupancy patterns in an office building. Comparison of different approaches based on CO<sub>2</sub> concentrations and computer power consumption. *Applied Energy* 199, pp. 121–141.
- (13) L. Castillo, R. Enríquez, M.J. Jiménez, M.R. Heras. 2014. Dynamic integrated method based on regression and averages, applied to estimate the thermal parameters of a room in an occupied office building in Madrid. *Energy and Buildings* 81, pp. 337-362.
- (14) H.P. Díaz-Hernández, P.R. Torres-Hernández, K.M. Aguilar-Castro, E.V. Macias-Melo, M.J.

- Jiménez. 2020. Data - Based RC Dynamic Modelling Incorporating Physical Criteria to Obtain the HLC of In Use Buildings: Application to a Case Study. *Energies* 13(2), 313.
- (15) B. Porcar, S. Soutullo, R. Enríquez, M.J. Jiménez. 2018. Quantification of the uncertainties produced in the construction process of a building through simulation tools: A case study. *Journal of Building Engineering* 20, pp. 377-386.
- (16) R. Enríquez, D. Bravo, J.A. Díaz, M.J. Jiménez. 2015. Mechanical ventilation performance assessment in several office buildings by means of Big Data techniques. 36th AIVC Conference. Spain. ISBN: 2-930471-45-X.
- (17) A.J. Alonso, S. Castaño, M. Pérez, M.J. Jiménez. 2018. Non-intrusive experimental assessment of air renovations in buildings and comparison to tracer gas measurements. 39th AIVC Conference. France. ISBN: 2-930471-53-2.
- (18) C. Sanjuan, M.N. Sánchez, M.R. Heras, E. Blanco. 2011. Experimental analysis of natural convection in open joint ventilated facades with 2D PIV. *Building and Environment* 46, pp. 2314–2325.
- (19) M.N. Sánchez, E. Giancola, M.J. Suárez, E. Blanco, M.R. Heras. 2017. Experimental evaluation of the airflow behaviour in horizontal and vertical Open Joint Ventilated Facades using Stereo-PIV. *Renewable Energy* 109, 613-623.
- (20) C. Sanjuan, M.N. Sánchez, R. Enriquez, M.R. Heras. 2012. Experimental PIV Techniques Applied to the Analysis of Natural Convection in Open Joint Ventilated Facades. *Energy Procedia* 30, pp. 1216-1225.
- (21) M.N. Sánchez, C. Sanjuan, M.J. Suárez, M.R. Heras. 2013. Experimental assessment of the performance of open joint ventilated façades with buoyancy-driven airflow. *Solar Energy* 91, pp. 131–144.
- (22) M.N. Sánchez, E. Giancola, E. Blanco, S. Soutullo, M.J. Suárez. 2020. Experimental Validation of a Numerical Model of a Ventilated Façade with Horizontal and Vertical Open Joints. *Energies* 13(1), 146. Special Issue: Building Energy Performance Measurement and Analysis.
- (23) R. Enríquez, L. Zarzalejo, M.J. Jiménez, M.R. Heras. 2012. Ground reflectance estimation by means of horizontal and vertical radiation measurements. *Solar Energy* 86(11), pp. 3216-3226.
- (24) O. Seco, A. Garrido, J.A. Ferrer, M.R. Heras. 2010. Análisis de Calidad de Aire en el interior de los C-Ddi del proyecto PSE - ARFRISOL. Congreso CONAMA 10. ISBN-978-84-614-6112-7.

# Métodos de obtención de información para caracterización térmica de muros en edificios existentes

Casos de estudio, descripción de la metodología y conclusiones

MAEE/3D-VCR. UNIVERSIDAD DE CASTILLA LA MANCHA (UCLM)

F.J. Castilla (1), V. Pérez (2), M. A. Mellado (3) / A. Adán (4), B. Quintana (5), S. A. Prieto (6) / C. Aparicio (7)

- (1) Dr. Arquitecto. Grupo de Investigación MAEE, Universidad de Castilla La Mancha, Cuenca (España).
- (2) Ing. de Edificación. Grupo de Investigación MAEE, Universidad de Castilla La Mancha, Cuenca (España).
- (3) Arquitecto. Grupo de Investigación MAEE, Universidad de Castilla La Mancha, Cuenca (España).
- (4) Dr. Ing. Industrial. (Grupo de Investigación 3D-VC&R, Universidad de Castilla La Mancha, Ciudad Real (España).
- (5) Dra. Ing. Industrial. (Grupo de Investigación 3D-VC&R, Universidad de Castilla La Mancha, Ciudad Real (España).
- (6) Dr. Ing. Industrial. (Grupo de Investigación 3D-VC&R, Universidad de Castilla La Mancha, Ciudad Real (España).
- (7) Grupo de Investigación "Diseño y Dirección de Proyectos", Universidad Politécnica de Valencia, Valencia (España).

Persona de contacto/Corresponding author: fcojavier.castilla@uclm.es (Francisco J. Castilla)

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1961-6174> (F.J. Castilla); <http://orcid.org/0000-0002-0370-9651> (A. Adán)

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7588-5833> (V. Pérez); <http://orcid.org/0000-0001-6462-4531> (B. Quintana)

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8341-2630> (S.A. Prieto); <http://orcid.org/0000-0003-2905-3686> (M.A. Mellado)

## Métodos de obtención de información para caracterización térmica de muros en edificios existentes. Casos de estudio, descripción de la metodología y conclusiones

### RESUMEN

En este trabajo se muestran distintos sistemas de monitorización de muros detallando la instrumentación y los procedimientos seguidos para el tratamiento de datos y obtención de resultados. A través de tres casos diferentes se exponen las aplicaciones que se han realizado y el uso de equipos de medida de temperatura, humedad y flujo de calor para interpretar el comportamiento térmico de los elementos constructivos estudiados a lo largo del tiempo. En el primer caso se estudia una fachada ventilada, en el segundo un muro de construcción tradicional de gran espesor y en el tercero una fachada multicapa de reciente construcción. Se describen los sistemas de medición en el interior y exterior de los paramentos. Como conclusiones se ponen de manifiesto las ventajas e inconvenientes de cada una de las técnicas y se apuntan las posibles líneas futuras de trabajo para optimizar este tipo de ensayos.

**Palabras clave:** Comportamiento térmico; Monitorización; Transmitancia; THM; HFM, QIRT

## *Data collecting methods for thermal characterization of walls in existing buildings*

### ABSTRACT

*In this article, different wall monitoring systems are shown detailing the instrumentation and procedures followed for data treatment and obtaining results. Application of several equipment are shown through three different cases, where temperature, humidity and heat flow have been measured to interpret the thermal behavior of the construction elements studied over time. In the first case, a ventilated façade is studied; in the second case, a wall of traditional construction of great thickness is analyzed; and in the third case, a multilayer façade of recent construction is monitored. The measurement systems inside and outside the walls are described. As conclusions, the advantages and disadvantages of each one of the techniques are revealed and the possible future research lines are pointed out to optimize this type of tests.*

**Keywords:** *Thermal behavior; Monitoring; U value; THM; HFM, QIRT*



## 1. Introducción

En este artículo se expone la aplicación de los métodos habituales de obtención y procesado de datos de temperatura y humedad a través de varios casos de estudio de elementos constructivos de fachada. Los objetivos son distintos en cada caso afectando, por tanto, al periodo y frecuencia de monitorización y la técnica e instrumental empleado.

Se han seleccionado tres casos que ilustran diferentes situaciones habituales en los trabajos de investigación de esta índole. Los dos primeros corresponden a trabajos de tesis doctoral en proceso de desarrollo con financiación propia, y el tercero, se ha realizado bajo el marco del Proyecto Nacional DPI2016-76380-R: “BIM Térmicos: creación automática y monitorización de modelos tridimensionales térmicos en interiores de edificios”. En el caso 1 la dificultad principal se encuentra en la forma de colocación de los sensores y obtención de datos en una cámara de aire no accesible. En el caso 2 se pretende instrumentar igualmente la sección interior de un muro, por un periodo largo de tiempo, con objeto de mostrar su comportamiento dinámico. En el caso 3, se trata de optimizar la toma de datos para generar a su vez la geometría del elemento monitorizado y ampliar el registro de datos en toda la superficie del paramento. Además, se pretende realizar una visualización de forma dinámica, más allá de una medición localizada en un punto o un entorno reducido (como en los casos anteriores).

En los casos 2 y 3 se han realizado además cálculos a partir de los datos monitorizados para determinar la transmitancia térmica del muro (U) siguiendo los distintos procedimientos existentes en la actualidad [1]. Existen numerosas publicaciones sobre este tipo de ensayos y estudios comparativos de las distintas metodologías (ISO 6946, ISO 9869, ISO 6781) donde a menudo, se ponen de manifiesto las dificultades e incertidumbres de cada uno de ellos. Otros de los temas a solventar son las pérdidas de información, derivadas de fallos en la instrumentación y la determinación del periodo de monitorización, para alcanzar las condiciones de ensayo mínimas u óptimas para garantizar unos resultados fiables. Otros trabajos se han centrado en la repercusión de distintos aspectos relacionados

con la colocación de los instrumentos o las condiciones del entorno en el resultado final de la medición o del cálculo. En este trabajo queremos centrarnos en la descripción y caracterización de los equipos y procedimientos usados.

En el mercado existen dataloggers de muy distintos rangos para mediciones de temperatura y humedad, pero los instrumentos específicos para obtener valores de transmitancias térmicas in situ suelen ser costosos. Se presenta por tanto una línea de evolución en los procedimientos de medida que pretende obtener el máximo rendimiento de la toma de datos, aprovechando otras operaciones, a menudo necesarias en los procesos de rehabilitación, para obtener la información necesaria para caracterizar térmicamente los paramentos.

En este sentido, también cabe destacar la escasa presencia en la literatura especializada de estudios específicos de caracterización de otros elementos constructivos (suelos, techos, ventanas) mediante estos procedimientos; probablemente debido a la mayor dificultad aun de cumplir las exigencias de las condiciones ideales de ensayo establecidas por la normativa.

Finalmente, en la mayoría de los casos, este tipo de ensayos pretende obtener valores fiables que permitan realizar simulaciones y predicciones del comportamiento energético de los edificios en distintos escenarios de implantación de medidas de gestión, renovación o influencia del cambio climático. La evolución de los procedimientos aquí expuestos pretende acercarse a ese objetivo. La integración de la información de una forma automatizada en los programas habituales de modelado y gestión de la información arquitectónica (BIM) y modelos de comportamiento energético en edificación (BEM), han sido, por tanto, parte de la experimentación que se expone en el caso 3.

## 2. Estudios de casos

### 2.1. Caso 1. Análisis de fachada vegetal (Escuela Politécnica de Cuenca)

Mediante esta monitorización se analizó un sistema de envolvente construido con contenedores de sustrato cerámicos y modulados utilizados como un revestimiento de fachada ventilada y ajardinada, en comparación con el aplacado de piedra existente en la actual fachada del edificio. Se pretendía comprobar que la temperatura y la humedad propia del sustrato y de las plantas se transfiere a la cámara de aire, a través de las paredes de las jardineras, haciendo descender su temperatura en verano y así posibilitar el aprovechamiento del aire contenido para la climatización de espacios del edificio. Por tanto, el objetivo principal era la medición de temperatura y humedad dentro de la cámara de aire.



Figura 1. Imagen del muro objeto de ensayo con sistema ajardinado instalado en sustitución del revestimiento calizo

El edificio se encuentra en la ciudad de Cuenca, en zona climática D2. Se materializaron dos series de prototipos modulares ajardinados en forma de cajones metálicos y cerámicos. Para anclarlos se utilizan los anclajes de las placas de piedra caliza que actualmente forman parte de una fachada ventilada (Figura 1). La fachada sobre la que se colocan tiene orientación este, con alto grado de exposición, no existiendo construcciones próximas a menos de 50m, y forma parte del cerramiento de los laboratorios de la Escuela Politécnica de Cuenca. En ellos se instala una red de riego y drenaje, creando dos diferentes sistemas

preparados para el cultivo del revestimiento vegetal. Sobre la fachada ajardinada y sobre la fachada de piedra ya existente, se instalan unos sensores que nos permiten recoger datos de temperatura y humedad.

El cerramiento de fachada ventilada de piedra está compuesto por medio pie de ladrillo macizo en su exterior, enfoscado exterior de cemento, aislamiento de poliestireno expandido de 50 mm, y trasdosado interior con medio pie de ladrillo hueco triple con guarnecido y enlucido de yeso interior. Exteriormente está cubierto con piezas de piedra caliza de 70 cm x 40 cm y 3 cm de espesor, suspendidas mediante anclajes de acero inoxidable anclados a la hoja exterior de la fachada con mortero de fraguado de rápido. Este revestimiento permite dejar unas juntas abiertas de 3 mm en vertical y horizontal, y una cámara de aire de 4 cm de espesor (Figura 2)

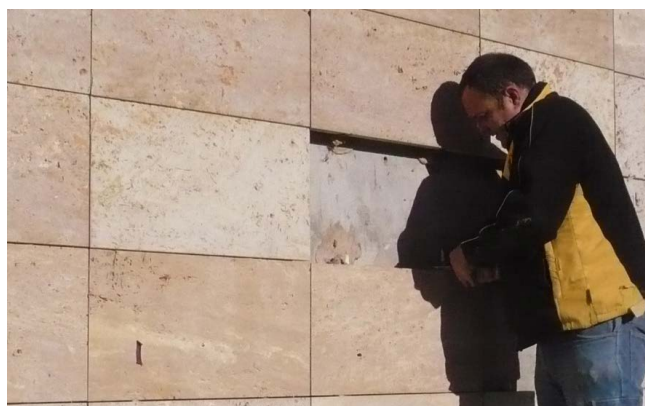


Figura 2. Desmontaje del sistema de fachada existente

En el experimento se sustituye el aplacado exterior por una piel vegetal que se nutre y se sustenta en sustrato de lombriz y fibra de coco irrigado periódicamente en función de las necesidades de las plantas. Se plantean dos alternativas: en el primer caso, los contenedores de sustrato tienen 66 cm de ancho, 36 cm de alto y 7 cm de profundidad, formados por fondo y laterales de chapa galvanizada de 1 mm de espesor. El frente se resuelve con malla electrosoldada galvanizada de varillas de 3 mm formando una trama de 10 cm x 5 cm conteniendo en su interior paquetes de rafia con el sustrato descrito en su interior. En el segundo caso se fabricaron

manualmente 16 contenedores cerámicos de 35 cm de ancho, 40 cm de alto y 7 cm de profundidad, con paredes de aproximadamente 1,2 mm de espesor, que contienen en su interior el sustrato de las plantas (Figura 3).

Para obtener los datos del comportamiento higrótico de los sistemas de fachada, se utiliza un sistema de sensores, gestión y almacenamiento de datos en estación HOBO U30 vía USB de 12-bits de resolución y dimensiones: 17.8 x 11.7 x 19.3 cm (peso de 2Kg). La estación funciona con batería recargable de 10 Amperios de 3-5 años de vida útil rango operable: -40°C a +60°C. Los sensores son S-THB-M002 Temperatura/H. Relativa 0-100% con cable de 2 m. Precisión  $\pm 0.2$  °C, 2.5 %RH. El sensor de la cara exterior se conecta con la estación (situada en el espacio adyacente interior) mediante perforaciones realizadas en el muro (selladas con material aislante).



Figura 3. Esquema de sistema de jardín vertical



Figura 4. Disposición de sensores en el cerramiento en diferentes estratos del cerramiento

Las condiciones meteorológicas del entorno e higróticas interiores se obtienen mediante una estación meteorológica Oregon Scientific WMRS200, con conexión USB, proporcionando datos de temperatura y humedad ambiental (resolución 1°C y 1%) interior y exterior (también permite recoger datos de viento y pluviosidad). La unidad se sitúa en el interior y la conexión es inalámbrica con el resto de los sensores. El software de gestión utilizado corresponde al proporcionado por cada uno de los fabricantes del equipamiento utilizado. La sincronización de las medidas para su análisis se realiza mediante uso de hoja de cálculo Openoffice Calc. Para cada uno de los cerramientos se disponen sensores de temperatura y humedad de ambiente interior y exterior, temperatura y humedad del aire de la cámara y temperaturas superficiales de interior y exterior del muro (Figura 4). Con ellos se registran datos cada 10 minutos.

Los datos fueron registrados entre los días 16 de marzo y 23 de marzo de 2016. No se ha dispuesto vegetación en las pruebas iniciales para poder conocer la incidencia de las piezas y el sustrato independientemente de las plantas al compararlo posteriormente con el producido con el efecto de la vegetación cuando el crecimiento de las mismas lo permita. Se obtienen menores temperaturas en la cámara de aire que corresponde al revestimiento de jardineras cerámicas en relación con las existentes en la cámara formada por el aplacado calizo original en la fachada del edificio en temperaturas ambientales por encima de 10°C. Se observan diferencias hasta de 5°C en condiciones de ambiente exterior próximas a 20°C y 32% de humedad relativa, propios de un día primaveral en el lugar (Figura 5). Se comprueba que en bajas temperaturas los resultados entre los dos sistemas se aproximan llegando incluso a igualarse, pero manteniéndose por encima de la temperatura ambiental. Comparando resultados entre los dos sistemas ajardinados, se comprueban comportamientos térmicos relativamente aproximados y muy por debajo de la temperatura ambiental, en condiciones medias.

Existe una tendencia de la temperatura en la cámara de aire formada por piezas cerámicas a aproximarse hacia los extremos de la temperatura ambiental, marcando diferencia entre 0°C y 2°C en relación a

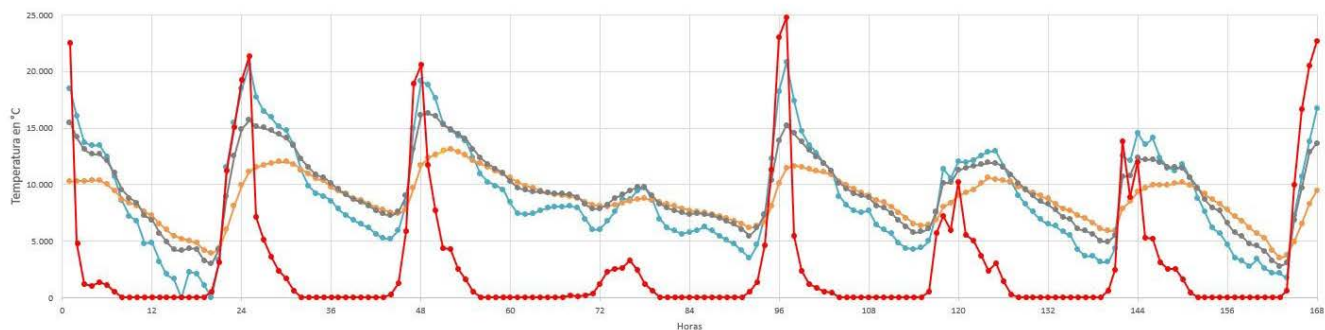


Figura 5. Gráfica representativa del comportamiento térmico comparado de la fachada caliza existente con la correspondiente a jardineras cerámicas. Caso 1. Temperaturas: Ambiente exterior (Azul) Cámara de aire con rev. jard. cerámica (naranja) Cámara de aire con rev. Piedra 3cm (gris) . Radiación Solar (Rojo)

la temperatura de la cámara de aire de las jardineras metálicas. En cualquiera de los sistemas existen apreciables diferencias de temperatura entre la cámara y el ambiente exterior. Los resultados detallados de esta investigación se pueden consultar en [2]

## 2.2. Caso 2. Medición de transmitancia en un muro de tierra de gran inercia (Vivienda en Campo de Criptana)

El objetivo de esta contribución es definir el comportamiento higrotérmico de un muro de tierra apisonada a través del análisis experimental, relacionando parámetros térmicos como la transmitancia y la conductividad con el contenido de humedad.

Las pruebas se desarrollaron en Campo de Criptana (Ciudad Real, España), en el clima mediterráneo seco, con clasificación D3 según CTE. El muro estudiado es un muro de tapia de tierra de 70 cm de espesor (orientado al norte) que pertenece a la planta baja de una vivienda tradicional habitada (entre medianeras y en el casco urbano, Figura 6). Se han monitorizado los valores ambientales y superficiales de temperatura y humedad, así como en varios puntos dentro de la pared y el flujo de calor en ambos lados. De esta forma, se han registrado los valores de temperatura y humedad durante un año y se han obtenido valores de transmitancia ( $U$ ) y conductividad ( $\lambda$ ), a partir del método HFM (Heat Flow Meter) considerando que el muro es homogéneo, a excepción de los revestimientos superficiales de mortero bastardo (de entre 3 y 4cm).



Figura 6. Ubicación del muro objeto de estudio en el edificio

Para la monitorización de las humedades y temperaturas superficiales y del interior del muro se ha utilizado un sistema inalámbrico llamado WilTemp, desarrollado por el Instituto de Tecnologías Físicas y de la Información y el Consejo Nacional de Investigación de España (ITEFI-CSIC). Se introducen dos barras de polipropileno de 22.5 cm de largo (una por cada lado del muro) con cuatro sensores de temperatura y humedad relativa (Sensirion SHT75, con precisión de  $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$  and  $\pm 1.8\%$ ), perforando agujeros en ambos lados (16 mm de diámetro) (Figura 7). Es importante no dejar espacio de aire entre el sensor y la pared para permitir la medición correcta en cada punto. Se usaron tapas de plástico para sellar los agujeros desde el exterior para garantizar una mayor precisión

de los sensores de superficie. Las barras generan poco calor, ya que su consumo de energía es bajo ( $<0.01$  mW) y la conductividad térmica de los tubos de plástico es mucho más baja que la de la pared misma, por lo que su influencia en los resultados es insignificante. Además, se utilizaron dos sensores de superficie adicionales para calibrar el último (con poca diferencia entre ellos), y dos más para medir los valores ambientales. Se utilizaron doce sondas en total. El sistema de monitorizado incluye además los siguientes dispositivos: Un receptor al que se conectan las barras mediante cable de datos, un multiplexer que recibe las señales y que se conecta por cable de datos a un ordenador instalado en el espacio interior. La fuente de alimentación: requerida, son 12 baterías AA. Esto ha sido más que suficiente para la monitorización de todo el año.

Junto con las sondas de temperatura y HR, se han instalado dos Termo fluxómetros (Hukseflux, modelo HFP-01, rango de medición entre  $-2000$  y  $2000$  Wm<sup>-2</sup>), uno pegado en la superficie externa de la pared y el otro en la superficie interna. Finalmente, se requiere un registrador de datos para cada una de las placas, por lo que se utilizó el modelo LI-19 también de la misma compañía. Todos los sensores del sistema WilTemp y los HFM, se ubicaron a una distancia adecuada (distancia  $> 2.10$ m de la ventana (3 veces el grosor), 2.50m del piso interno y 2.35cm del piso externo. (Figura 8)

La duración de la prueba fue de 361 días (14 de diciembre de 2017 al 10 de diciembre de 2018), y el intervalo entre lecturas fue de 5 minutos en el sistema WilTemp (los datos se registraron en una computadora en archivos .txt, para evitar restricciones de memoria), y 15 minutos para los HFM (la capacidad del registrador de datos era de 3518 lecturas, por lo que era necesario descargar los datos al menos una vez al mes y luego reiniciar el registrador de datos (Figura 9). Los datos se almacenan conjuntamente en un archivo en formato .csv que se usa para analizar los periodos en los que se cumplen las condiciones necesarias, acorde a la norma ISO 9869-1 (ISO, 2014) que describe las pruebas experimentales en paredes que utilizan HFM para obtener la resistencia térmica (R en m<sup>2</sup>KW<sup>-1</sup>, Ec. 1), la conductancia térmica entre temperaturas de superficie ( $\Lambda$  en Wm<sup>-2</sup>K<sup>-1</sup>, Ec. 2) y la transmitancia térmica entre temperaturas ambiente (U en Wm<sup>-2</sup>K<sup>-1</sup>, Ec. 3).

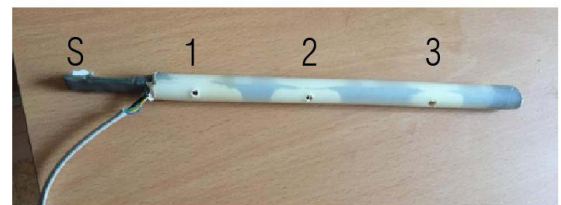
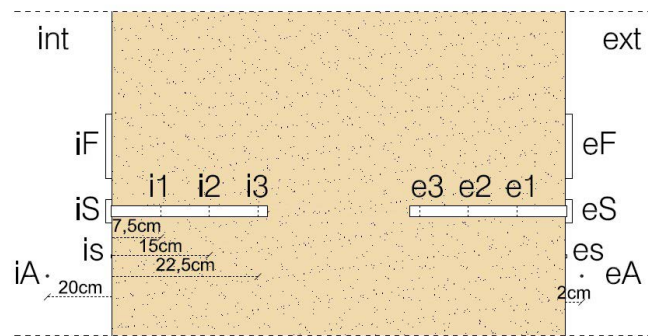


Figura 7. Sección del muro de 70 cm de espesor. - ubicación de equipos (HFM, y barras con sensores ambientales y de superficie)

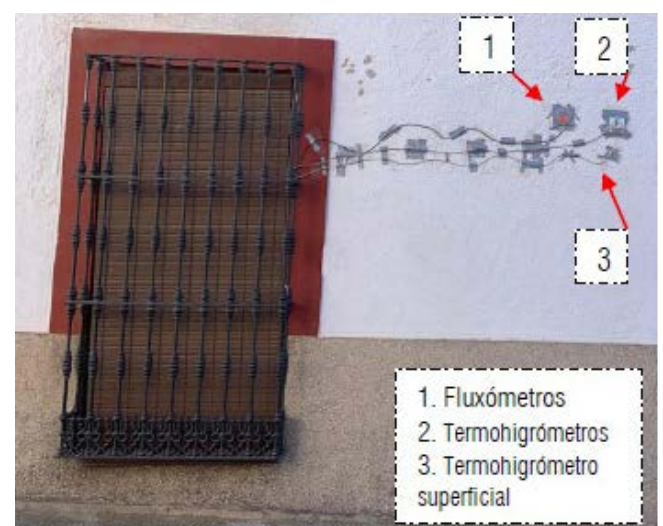
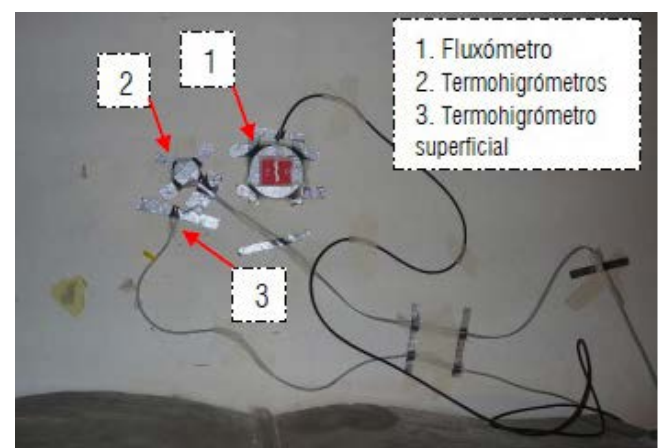


Figura 8. Imágenes de disposición de los dispositivos y conexiones en la cara interior y exterior del paramento.

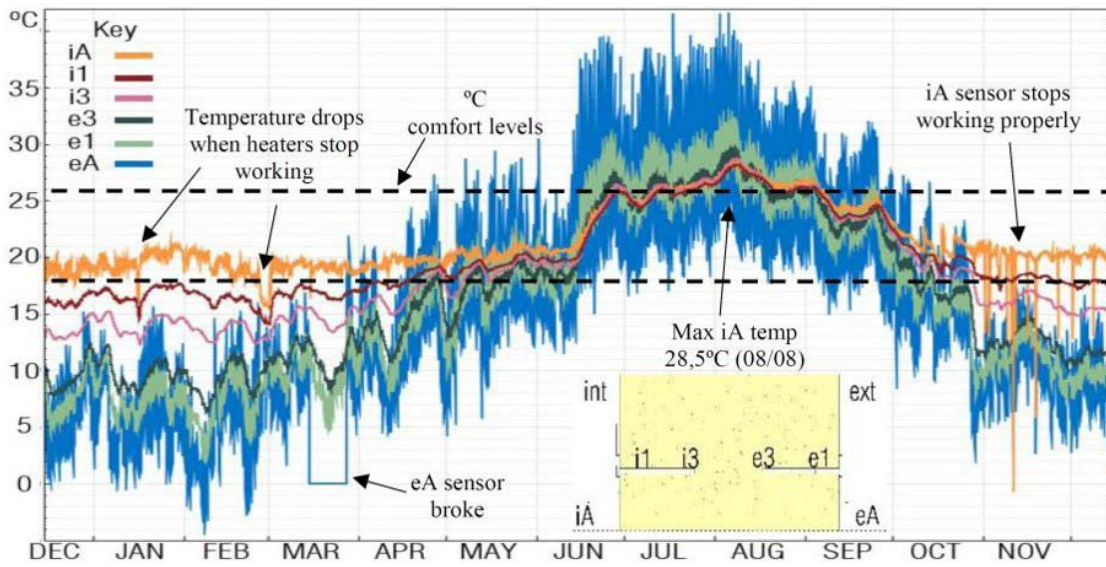


Figura 9. Grafica representativa de temperaturas internas y externas ambientales (iA y eA) y temperaturas dentro de la pared (i1, i3, e3 y e1) durante el año completo. Caso 2

$$R = \frac{\sum_{j=1}^n (Ts_{ij} - Ts_{ej})}{\sum_{j=1}^n q_j} \quad (1)$$

$$\Lambda = \frac{1}{R} \quad (2)$$

$$U = \frac{\sum_{j=1}^n q_j}{\sum_{j=1}^n (T_{ij} - T_{ej})} \quad (3)$$

Tabla 1. Nomenclatura

$h_{in}$	coeficiente de convección interior (W/(m <sup>2</sup> K))
$T_e$	temperatura exterior del aire (K)
$T_i$	temperatura interior del aire (K)
$Ts_i$	temperatura superficial interior (K)
$Ts_e$	temperatura superficial exterior (K)
$q$	flujo de calor por conducción (W/m <sup>2</sup> )

La tabla 1 recoge la nomenclatura específica de las variables usadas en las ecuaciones 1 a 4.

Se requiere un período de al menos una semana antes de que el valor U se establezca dentro de  $\pm 5\%$  (requisito de cumplimiento de ISO 9869) del valor final determinado a partir de datos de aproximadamente 27 días, mostrando los resultados en un gráfico que muestra la variación de transmitancia térmica a lo largo de la prueba (valor U acumulativo). Estas condiciones se han conseguido entre el 14 de diciembre de 2017 y el 14 de enero de 2018.

Los resultados muestran que es difícil considerar un comportamiento higrotérmico de un muro de tierra apisonada de forma homogénea durante todo el año, ya que grandes variaciones en los valores registrados en el interior. Para evaluar el comportamiento térmico de la pared, se descubrió que no es apropiado considerar el

mismo valor de  $\lambda$ - para toda la sección de la pared, ya que este valor varía según su contenido de humedad y, por lo tanto, se proponen valores estacionales para U en función de los valores de HR medidos en el interior. Sin embargo, se ha demostrado la estabilidad higrotérmica que este tipo de estructuras proporciona a los espacios que encierran, especialmente en períodos cálidos y secos. Para ilustrar más claramente este aspecto, se eligieron dos períodos de 11 días para los resultados: 20-30 de diciembre de 2017 y 5-15 de julio de 2018. Estos momentos representan condiciones climáticas extremas en el clima donde se encuentra el edificio y se han representado mediante gráficos dinámicos.gif (que se pueden visualizar en <https://bit.ly/2ysbsMy>). El trabajo completo se encuentra publicado en [3]

### 2.3. Caso 3. Temperaturas superficiales en espacio interior (Instituto de Tecnología de la Construcción y Telecomunicaciones, Cuenca)

El objetivo de este experimento es probar el método desarrollado para gestionar la información disponible a partir de nubes de puntos procedentes de escaneado laser conjunto con termografía infrarroja. La información obtenida permite generar modelos geométricos de espacios a partir de nubes de puntos (exportables a programas de simulación) y contrastar simulaciones CFD (Computational Fluid Dynamics) con datos obtenidos a través de termografías, estableciendo un procedimiento para poder comparar los resultados de manera cuantitativa. Asimismo, a partir del uso de termografías secuenciales se pueden obtener transmitancias térmicas de elementos de forma automática (por el procedimiento termométrico) o visualizar resultados de evolución de temperatura en envolventes edificatorias de forma dinámica. En segunda instancia, a partir de estos podemos obtener mapas de temperatura radiante de los paramentos y a partir de ellos la temperatura operativa, con mayor precisión y en distintos momentos, a efectos de determinar el confort en los puestos de trabajo de una oficina o aula.



Figura 10. Imagen exterior de la fachada y espacio objeto de estudio

El espacio objeto de estudio para la experimentación es una sala de uso esporádico (de 7m x 10m en planta), situada en el Instituto de Tecnología de la Construcción y las Telecomunicaciones, ubicado en el campus universitario de Cuenca, junto al edificio descrito en el caso 1

(Figura 10). La composición y características de los elementos constructivos que conforman la envolvente también son conocidas. La disposición de una doble hoja con aislamiento exterior minimiza el efecto de los puentes térmicos de pilares y forjados de hormigón (Figura 11).

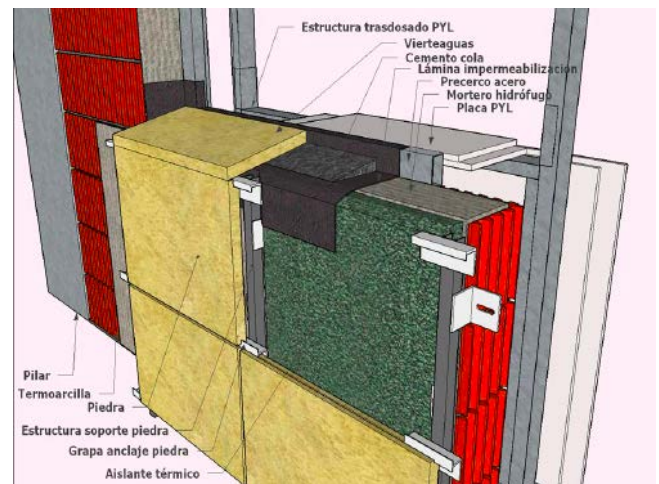


Figura 11. Composición del muro objeto de estudio. (Imagen: Manuel Muelas)

Se analiza solo el comportamiento de una pared cuya normal está orientada al norte, y el experimento se realiza a finales del mes de abril de 2018, por lo que el soleamiento que recibe es prácticamente nulo. La pared dispone de un hueco central sin protecciones solares y con la simple obstrucción provocada por el retranqueo del mismo respecto a los paramentos interior y exterior. La toma de datos se realiza durante un periodo de 24h.

Para la toma de datos se ha utilizado un escáner 3D modelo Riegl VZ-400 (Figura 12b). El escáner obtiene nubes de puntos en un rango de 500m. Una toma cubre un área de 360°x100° y para unas resoluciones angulares de 0.08° (tanto vertical como horizontal) se obtienen 5 millones de coordenadas en 47 segundos. La precisión de medida de distancia es de 5mm y la repetitividad de 3mm. Al escáner se acopla una cámara térmica modelo FLIR A65, que cuenta con una resolución de 640x512 pixels, un campo de visión (FOV) de 45°x37° y con una frecuencia de 30Hz. El rango de temperatura en modo de alta ganancia es de [233K-823K] con una precisión de 0.4K. Se realiza una primera toma de escaneado del espacio en 360° con solapamiento de imágenes de un 20%, lo que permite

obtener la nube de puntos necesaria para el modelado. Posteriormente se realiza el escaneado térmico cada 30 min y durante 24h (48 tomas) sobre el paramento interior de la fachada norte, realizando 13 fotos cada toma. Para la obtención de los valores de temperatura se realiza una corrección de las lecturas en base a una ecuación obtenida tras el procedimiento de calibración de la cámara con cuerpo negro.

Para registrar la temperatura del aire interior, se utiliza la misma estación y sistema de sensores HOBO U30 NRC descrita en el caso 1 (Figura 12a) y otro de ambiente interior separado del paramento. Se han colocado sensores para medir la temperatura superficial en el paramento objeto de estudio, para contrastar el resultado de los valores obtenidos en la termografía y determinar la influencia de la emisividad de los materiales en las mediciones, con el fin de utilizar la información térmica en el cálculo de transmitancia. Se colocan siete sensores: tres sobre el enlucido de yeso, uno en la carpintería de aluminio, uno en el vidrio (sobre cinta adhesiva), uno sobre el rodapié de madera y otro de ambiente interior separado del paramento. Se coloca adicionalmente una lámina de aluminio reflectante con objeto de determinar la influencia de las radiaciones reflejadas en dichos estudios.



Figura 12. a) sensores de superficie y dispositivo HOBO. b) montaje de escáner y cámara termográfica

Los datos se registran cada 10 min, de modo que luego se hacen coincidir los correspondientes con los tomados por el escáner cada 30 min. El volcado y tratamiento de estos datos se realiza en archivo en formato .xls. Las condiciones exteriores se recogen en una es-

tación meteorológica DAVIS VANTAGE situada en la cubierta del edificio, que permite obtener Radiación solar, Velocidad del viento, precipitación, Humedad Relativa y Temperatura. La estación, se encuentra continuamente en funcionamiento, debiéndose realizar la descarga de datos periódicamente con conexión USB. Para ver más detalles de este trabajo consultar [4].

En este caso, para la obtención de la U del muro se ha utilizado el método termométrico según la Ec.4. Se han seleccionado los datos de la monitorización donde el salto térmico (int-ext) es superior a 5°C (el máximo es 11°C) correspondientes a la franja entre las 0h y las 8:00h. Se ha podido comprobar que la diferencias entre el valor obtenido usando las temperatura superficial media de los sensores es aproximadamente un 15% inferior de la obtenida usando la temperatura media radiante del paramento (la diferencia es aún mayor si no se realiza la corrección de las lecturas de la cámara mediante una curva de calibración definida previamente). El valor obtenido es un 9% inferior al nominal calculado según ISO 6946 para el muro. A pesar de que el tiempo de medición ha sido relativamente corto, se han comprobado las condiciones ambientales de los días previos y posteriores garantizando un comportamiento estable que minimiza los efectos de la inercia térmica.

$$U = \frac{h}{(T_i - T_e)} \ln(T_i - T_{Si}) \quad (4)$$

Finalmente, para este trabajo se ha desarrollado un algoritmo para poder comparar los resultados de temperaturas de un plano próximo al paramento, obtenidas de la simulación del espacio interior, con las mediciones realizadas con la cámara térmica. Para ello se han de extraer, de la nube de puntos térmica correspondiente al instante en el que se realiza la simulación CFD, los datos segmentados de la misma forma que la malla usada en el análisis CFD

La segmentación la proporciona una aplicación desarrollada en Matlab que permite leer las coordenadas proporcionadas por el archivo de exportación .csv del programa de simulación, comparar las diferencia entre las temperaturas y visualizarlas gráficamente en la misma aplicación o exportarlas en archivo .csv para su posterior análisis estadístico, (Figura 13).





```

<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<gltXML temperatureUnit="C" version="0.32" useSIUnitsForResults="true" volumeUnit
xml:ns="http://www.gltxml.org/schema">
  <Campus Id="cmp_1">
    <Location>
      <Name>Generated Building</Name>
      <ZipcodeOrPostalCode>wcl 010h</ZipcodeOrPostalCode>
    </Location>
    <Building Id="GeneratedBuilding" buildingType="Office">
      <Area>69.2825</Area>
      <Space Id="Habitacion">
        <Name>Habitacion</Name>
        <Area>69.2825</Area>
        <Volume>262.5764</Volume>
        <ShellGeometry Id="HabitacionShellgeom">
          </ShellGeometry>
        </Space>
      </Building>
    </Campus>
  </gltXML>

```

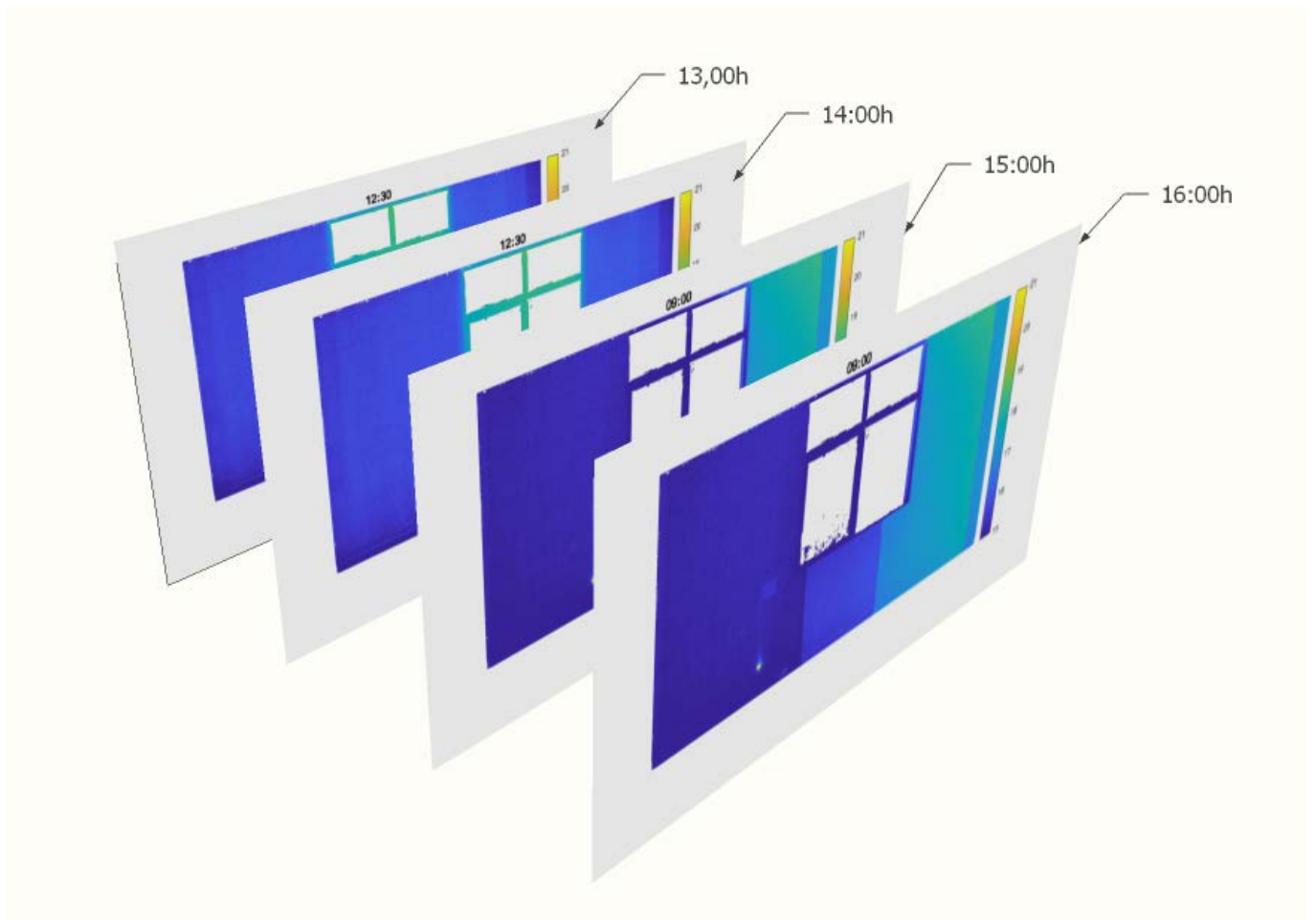
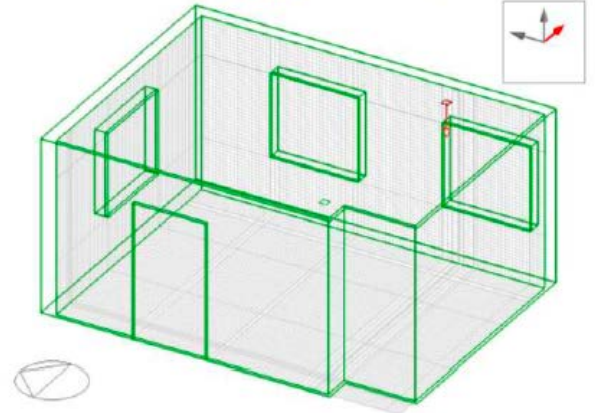


Figura 13. Datos obtenidos en las distintas fases de trabajo a) nube de puntos, b) geometría en formato xml para importar desde programa de simulación, c) secuencia de imágenes termográficas del paramento a estudiar. Caso 3

### 3. Conclusiones

En estos tres casos se han usado distintas técnicas para monitorizar datos de temperaturas, principalmente con objeto de estudiar el comportamiento de elementos constructivos, pudiéndose sacar algunas conclusiones y recomendaciones para futuros trabajos. Para la representación del comportamiento a lo largo del tiempo, se han considerado suficientemente representativas mediciones cada 30 min, no obstante para la obtención de valores de U las diferencias en el resultado pueden variar hasta un 10% si se contemplan frecuencias de registro menores (10-15 min). Este debía ser por tanto un parámetro a homogeneizar de cara a poder contrastar resultados de distintos ensayos. La utilización de equipos como los expuestos en los distintos casos para monitorización de periodos largos de tiempo resulta ser muy costosa, ya que los equipos son caros y quedan inoperativos para otros experimentos. La necesidad de cableado dificulta la instalación en sitios habitados y de uso continuo. Finalmente, las mediciones puntuales resultan a veces poco representativas del conjunto del elemento. En este sentido, la termografía ha demostrado ser un instrumento eficaz, que debidamente calibrada, puede aportar datos cuantitativos similares a los de los procedimientos mencionados. Si además pretendemos obtener la geometría de un espacio de forma automática, podemos integrar ambas operaciones ahorrando en el uso de otros equipos. En cualquier caso su uso se limita a periodos relativamente cortos (cuando se pretende hacer de forma automatizada) y a espacios sin uso continuo, lo que es una dificultad a la hora de cumplir con los periodos de registro establecidos por las normativas para obtener valores de transmitancia. Como complemento para realizar el monitorizado de paramentos parece que la incorporación de técnicas basadas en sensores de bajo coste con conexión inalámbrica, de forma que se amplíen los puntos de toma de datos sobre el elemento (aunque se disminuya la precisión) puede ser el camino del futuro para mediciones de larga duración, en este sentido se está trabajando en un nuevo proyecto (Proyecto Nacional BIA2017-86811-C2-2-R. "Calibración de Modelos BIM mediante sensores de bajo coste para la Optimización Energética de edificios") que permite comprobar la viabilidad de esta propuesta y contrastar con los métodos y el instrumental expuesto.

### 4. Bibliografía

- (1) Bienvenido-Huertas, D.; Moyano, J.; Marín, D.; Fresco-Contreras, R. 2019. Review of in situ methods for assessing the thermal transmittance of walls. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 102, 356–371. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.016>.
- (2) Pérez-Andreu, V.; Aparicio-Fernández, C.; Castilla, F.; Vivancos, J.-L. 2017. Development and Characterization of Modular Ceramic and Metal Elements in Vertical Gardens and Ventilated Façades in Buildings. *Project Management and Engineering Research: AEIPRO 2017* 189–202. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-92273-7\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-319-92273-7_13).
- (3) Mellado Mascaraque, M.Á.; Castilla Pascual, F.J.; Oteiza, I.; Aparicio Secanellas, S. 2020. Hygrothermal assessment of a traditional earthen wall in a dry Mediterranean climate. *Build. Res. Inf.* 1–13. <https://doi.org/10.1080/09613218.2019.1709787>.
- (4) Pérez Andreu, V.; Castilla Pascual, F. J.; Adan Oliver, A. Q.; Galera, B.; Prieto Ayllón, S.A. 2019. Point clouds 5d management for the energy analysis of buildings, in: *23rd Int. Congr. Proj. Manag. Eng., AEIPRO*, Spain, Málaga, 1244–1253. <http://dspace.aepro.com/xmlui/handle/123456789/2399>.

# Sistema de información del sistema Cyber-Físico SmartPoliTech

SmartPoliTech. UNIVERSIDAD DE EXTREMADURA (UNEX)

P. Núñez (1), S. Barroso (2), B. Muriel (3), M. Lucas (4), B. Montalbán (5), P. Bustos (6)

- (1) Dr. Ingeniero de Telecomunicación. Subdirector TIC e Investigación, Escuela Politécnica, Cáceres (España).
- (2) Ingeniería de Telecomunicaciones. Personal Contratado Investigador. Universidad de Extremadura, Cáceres (España).
- (3) Arquitectura Técnica. Personal Contratado Investigador. Universidad de Extremadura, Cáceres (España).
- (4) Grado en Edificación. Personal Contratado Investigador. Universidad de Extremadura, Cáceres (España).
- (5) Arquitectura. Personal Docente Investigador. Universidad de Extremadura, Cáceres (España).
- (6) Ingeniería Informática. Personal Docente Investigador. Universidad de Extremadura, Cáceres (España).

Persona de contacto: pnuntru@unex.es (P. Núñez)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3615-883> (P. Núñez)

## Sistema de información del sistema Cyber-Físico SmartPoliTech

### RESUMEN

Un sistema Cyber-Físico (SCF) como el del proyecto SmartPoliTech requiere la definición detallada de su arquitectura y de cada uno de los componentes y agentes de las que está formado. La interconexión del mundo físico - sensores y actuadores - con el mundo virtual con el objetivo de, entre otros, mejorar la eficiencia energética de los edificios a partir del histórico de datos, se realiza en el SCF SmartPoliTech a través de una arquitectura orientada a servicios. La arquitectura planteada en el proyecto SmartPoliTech tiene como principal ventaja la modularidad y escalabilidad, además de la robustez y seguridad del sistema completo. En este artículo se detalla la arquitectura del SCF desplegado en los edificios de la Escuela Politécnica, listando cada una de las capas y dando una representación formal al sistema de información utilizado en el proyecto SmartPoliTech.

**Palabras clave:** Sistemas Cyber-Físicos; Arquitecturas orientada servicios; Modelo de mezcla de Gaussianas; Eficiencia energética.

## *Information system of the Cyber-Physical System SmartPoliTech*

### *ABSTRACT*

*A Cyber-Physical system (SCP) such as SmartPoliTech requires the detailed definition of its architecture and of each of the components and agents of which it is composed. The interconnection of the physical world - sensors and actuators - with the virtual world with the aim of, among others, improving the energy efficiency of buildings based on historical data, is carried out in SCP SmartPoliTech through a service-based architecture. The architecture proposed in SmartPoliTech has as its main advantage the modularity and scalability, as well as the robustness and security of the complete system. This article details the architecture of the SCF deployed in the buildings of the School of Engineering, listing each of the layers and giving a formal representation of the information system used in the SmartPoliTech project.*

**Keywords:** *Cyber-Physical Systems; Service Oriented Architectures; Gaussian Blending Model; Energy Efficiency.*

## 1. Introducción

El concepto de Smart Cities and Communities (S&CC) y sus beneficios para la sociedad se convertirá en una realidad en los próximos años. Las tecnologías que se incluyen en el término SmartX, como el Cloud Computing, el Big Data, la Inteligencia Artificial o el Internet de las cosas (IoT) están evolucionando de forma significativa a la vez que se integran en diferentes sectores de la sociedad. En este espacio, surgen los Smart Campus para abarcar diferentes objetivos dependiendo de su diseño: desde la optimización de la ocupación de los espacios, hasta la eficiencia, confort o seguridad en las instalaciones (1), (2).

La realidad que se puede ver en muchas de las instalaciones universitarias es el desperdicio de recursos energéticos y agua, falta de confort y la baja utilización de espacios y recursos asignados en un principio a una tarea en concreto. Por esta razón es necesaria la implementación de sistemas que permitan el control y mantenimiento de recursos, de forma que los edificios que conforman un Smart Campus sean gradualmente más eficientes y mejor adaptados a la demanda real de sus usuarios. Los Smart Campus por lo general se centran en la automatización de los edificios para integrar las principales instalaciones del sistema, como calefacción, ventilación, aire acondicionado, luz, medidores de potencia, contadores de agua, etc. (2).

Motivado por las iniciativas Smart Campus actuales, este artículo describe SmartPoliTech, un Sistema Ciber-Físico (SCF) de la Universidad de Extremadura. SmartPoliTech está desplegado desde 2013 en la Escuela Politécnica de Cáceres, un complejo universitario formado por siete edificios, donde se han desplegado más de 200 sensores que monitorizan el consumo de electricidad, gas, agua, etc. (ver Figura 1).

El framework IoT que se presenta en este artículo facilita la comunicación entre los distintos sistemas, la visualización de datos, el modelado del consumo, las aplicaciones de alto nivel y los servicios para diferentes perfiles de usuario.

El SCF que se presenta en este documento desarrolla una Arquitectura orientada a Servicios (SOA, del inglés Service Oriented Architecture), que hace uso de un bus de servicio (ESB, del inglés Enterprise Service

Bus) para permitir diferentes comunicaciones bidireccionales y servicios IoT entre diferentes subsistemas del SCF. La contribución principal que se pretende con este artículo es la descripción formal del SCF, identificando todos los componentes y agentes que lo componen, haciendo del mismo una solución integral para la resolución de muchos de los problemas presentados a la hora de desplegar un Smart Campus: reducir el consumo de energía, maximizar la seguridad, y optimizar los recursos que se dispone (1).

Tras una breve introducción que describe la motivación principal de este documento, a continuación, se detalla el proyecto SmartPoliTech y una vista general del SCF. A partir del mismo, las siguientes secciones detallan cada uno de los subsistemas que conforman este Smart Campus.



Figura 1. Vista aérea de los edificios de la Escuela Politécnica de la Universidad de Extremadura.

## 2. Proyecto SmartPoliTech

### 2.1. Introducción a SmartPoliTech

SmartPoliTech (3) es un SCF en desarrollo dentro de la Escuela Politécnica. Su objetivo principal es la transformación de sus instalaciones en un gran ecosistema experimental, un living-lab para el diseño, implementación, integración y validación de sistemas capaces de crear y gestionar entornos inteligentes y sostenibles. SmartPoliTech hace uso de tecnologías IoT para promover entre sus usuarios hábitos responsables de consumo de los recursos en el centro, mientras que a la vez intentar mejorar la eficiencia en cuanto al uso de los recursos energéticos en sus instalaciones. La

Escuela Politécnica, que fue construida hace 30 años, presenta una serie de anomalías en el consumo de luz y agua debido a su antigüedad y la falta de adaptación de los edificios. Algunas de estas anomalías son:

- Excesivo consumo de agua sanitaria. Los datos recogidos en los últimos años muestran que se consume, de media, unos 4000 m<sup>3</sup> de agua al año.
- Ineficiente consumo de la energía eléctrica o gasoil. En un año, se consume en torno a 60 m<sup>3</sup> de Diesel.
- Mala calidad del aire interior debido a la falta de ventilación, lo que se traduce en altas concentraciones de CO<sub>2</sub>.
- Falta de control térmico en las instalaciones, alternando períodos de mucho frío con otros períodos de mucho calor.

Este centro universitario tiene unos 1500 usuarios y consiste de siete edificios de más de 20000 m<sup>2</sup>, distribuidos en tres plantas. En todos ellos se ha desplegado un conjunto de sensores para la medición del consumo de energía, agua, gas, etc. De forma similar,

a lo largo de sus instalaciones hay sensores midiendo variables como temperatura, humedad, CO<sub>2</sub>, etc. La combinación del histórico de datos existente desde 2013 con algoritmos de inteligencia artificial, permite establecer una hoja de ruta hacia un SCF para conseguir edificios más sostenibles e inteligentes.

SmartPoliTech sigue un diseño basado en la arquitectura que se muestra en la Figura 2. Como se aprecia en la figura, se diferencian cuatro áreas principales: Virtualización, Persistencia, Procesos y Vistas.

**Virtualización:** La virtualización engloba al conjunto de servidores y máquinas virtuales en los que se ha realizado el despliegue de las bases de datos, bus de servicios y software de visualización.

El diseño de esta capa se ha planteado de tal manera que en un servidor se alojan las distintas máquinas virtuales funcionando de manera independiente. Actualmente existe una máquina virtual para cada uno de los elementos que componen la arquitectura.

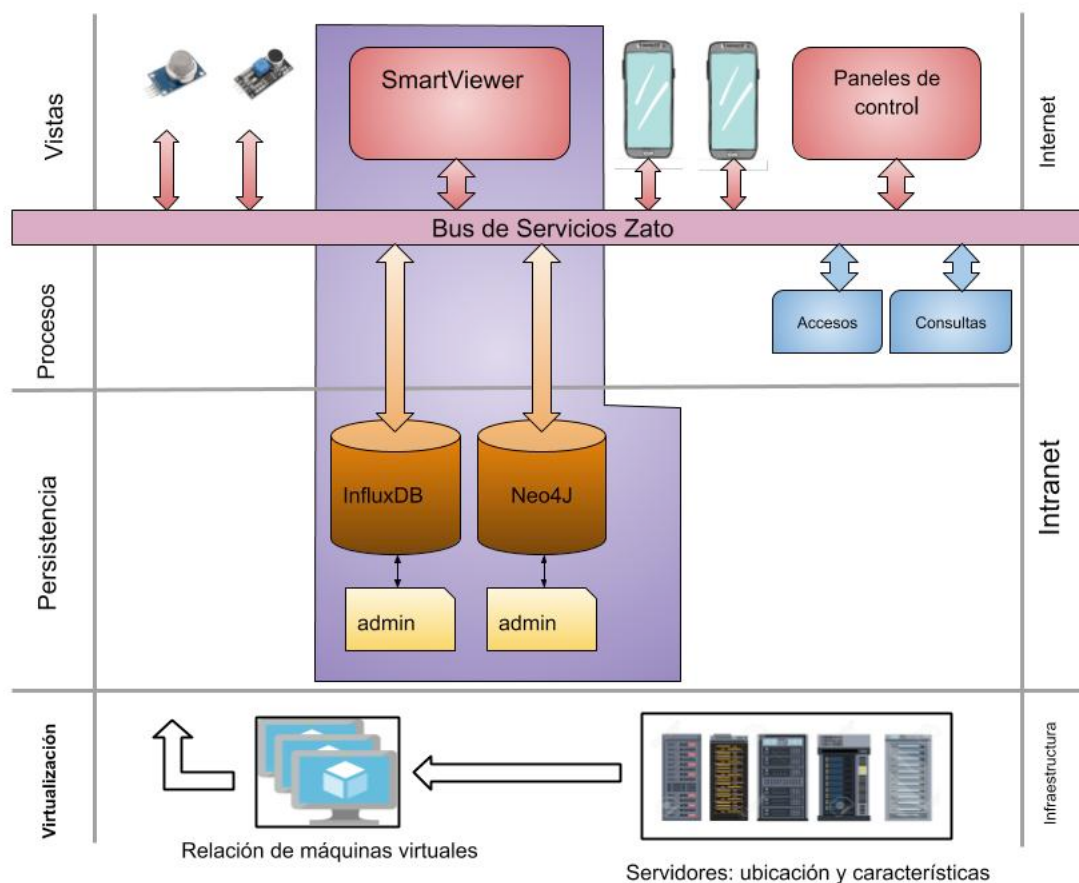


Figura 2. Sistema de información de la Escuela Politécnica.

La **persistencia** se lleva a cabo a partir de las dos bases de datos que almacenan diferentes características recogidas en el SCF. Una de estas bases de datos es InfluxDB (4), cuya característica principal es que está orientada al almacenamiento de series temporales. Este tipo de base de datos resulta ideal para almacenar los datos generados por todos los sensores que se han distribuido por la EPCC, dado que dichos sensores generan datos enlazados con una marca de tiempo de forma periódica. Además, en el caso concreto de InfluxDB, resulta una base de datos sencilla de utilizar y que está integrada en distintos softwares de visualización de forma nativa, como Grafana.

La otra base de datos de la que hace uso SmartPoliTech es Neo4J (5), una base de datos orientada a grafos que permite almacenar una estructura espacial de la EPCC en base a nodos y relaciones entre dichos nodos. De esta forma, se ha desarrollado un grafo que relaciona los distintos pabellones que forman la Escuela, las distintas plantas que posee cada pabellón, las habitaciones que forman cada planta de los pabellones y algunos elementos que se encuentran dentro de dichas habitaciones. La Figura 6 muestra un fragmento de la base de datos de la EPCC para el pabellón de informática. Neo4j permite añadir atributos para la geolocalización de cada sensor en el mundo lo que, en combinación con herramientas como MapBox, permite el desarrollo de visores interactivos para los usuarios de la Escuela Politécnica.

La capa **Procesos** hace referencia al bus de servicios que permite la simplificación de la interacción de los sensores y el usuario con Neo4J e InfluxDB. Dicho bus de servicios está desplegado sobre ZATO (6), un servidor de solicitudes escrito en Python que se puede utilizar para construir middleware y sistemas Backend. En el SCF implementado, ZATO se usa para facilitar el almacenamiento de los datos generados por los sensores en InfluxDB, permitir el acceso a NEO4j para construir un visor interactivo de la EPCC y los servicios que puedan ir surgiendo como necesidad con el uso de SmartPoliTech, como el caso de uso.

Finalmente, la capa **Vistas**, hace referencia a distintos aspectos. Por una parte, engloba a los más de doscientos sensores desplegados en la EPCC y que recogen datos sobre distintas variables relacionadas con el control y monitorización de los edificios. Este mismo campo engloba a todas las posibilidades de acceso y visualización de las que disponen los usuarios de la Escuela Politécnica. Entre estas posibilidades destaca Grafana (7), una herramienta de análisis y visualización de datos open source, en la que se han desarrollado toda una serie de gráficas a partir de los datos recogidos por los sensores y que están disponibles para los usuarios tanto a través de una web, como en una red de televisores distribuidos por la Escuela Politécnica. Otra de las posibilidades para los usuarios es el acceso al visor de la EPCC, que se muestra en la Figura 3, en el que de forma interactiva pueden consultar datos en tiempo real de los sensores, visualización de cámaras e incluso información sobre los horarios de tutorías y correos de los profesores. Ambos sistemas permiten además integrar alarmas por consumo energético excesivos, que pueden ser fijadas en el caso de Grafana o variables en el caso del visor map-box en función del histórico de datos recogidos por los sensores. A continuación, este documento se centra en el diseño del SCF.

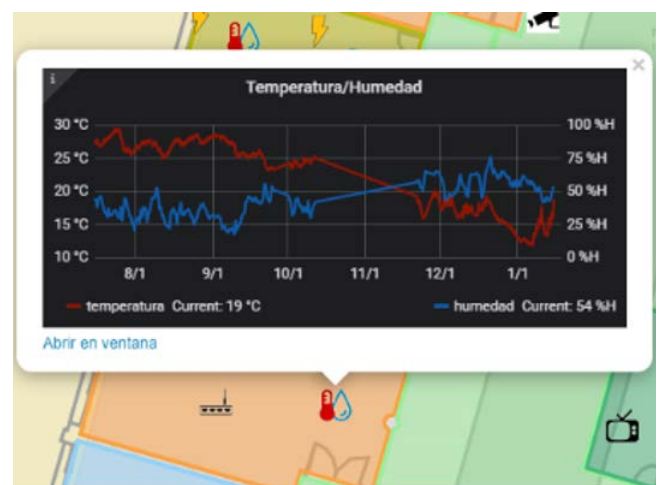


Figura 3. Visor interactivo SmartPoliTech, EPCC.

### 3. Diseño del SCF SmartPoliTech

El SCF propuesto en este documento está compuesto por varios sistemas independientes, algunos de ellos simples sensores que recogen datos y otros más complejos. Siguiendo una nomenclatura parecida a otros artículos relacionados (8), el SCF SmartPoliTech S, está formado por los siguientes subsistemas: Mundo Físico  $W$ , encargado de recopilar la información del entorno y almacenar dichos datos en servidores locales,  $D$ . El conjunto de queries y servicios proporcionados por el SCF,  $Q$ , se lleva a cabo mediante una arquitectura orientada a servicios. Finalmente, el sistema incluye un subsistema para la visualización de los datos  $V$ . Por tanto,  $S=(W,D,Q,V)$ . Las siguientes subsecciones describen el SCF propuesto en detalle.

#### 3.1. Diseño del Mundo Físico

En el SCF propuesto, el mundo físico  $W$  consiste de un conjunto de sensores físicos que son clasificados de la siguiente manera: i) sensores de temperatura ambiente ( $w_t \in W$ ), ii) sensores de humedad relativa ( $w_h \in W$ ), iii) contadores de agua ( $w_s \in W$ ), iv) sensores de presencia y localización ( $w_p \in W$ ), v) sensores de temperatura en calderas ( $w_b \in W$ ), vi) sensores de consumo de gas ( $w_g \in W$ ), vii) estado de ventanas (abiertas cerradas

( $w_w \in W$ ), viii) sensores de consumo de electricidad ( $w_e \in W$ ) y ix) sensores de  $CO_2$  ( $w_{CO_2} \in W$ ). Así pues,  $W$  puede ser expresado como se refleja en la Expresión 1. Este subsistema no es cerrado y puede ser extendido con nuevos sensores si fuera necesario. La Figura 4 muestra un diagrama del sistema físico implementado en los edificios del Campus.

$$[1] \quad W=(w_t, w_h, w_s, w_p, w_b, w_g, w_w, w_e, w_{CO_2})$$

Por lo general cada sensor tiene una serie de componentes que le permiten capturar eventos del mundo real, adaptar esos eventos a variables físicas en las que son medidos, conectarse a internet y enviar esos datos haciendo uso de los servicios implementados en  $Q$  para almacenarlos en las bases de datos  $D$ . Además, los sensores están nombrados por un identificador único que facilita la organización de los datos en las bases de datos y el uso de los servicios proporcionados por el SCF.

#### 3.2. Diseño del Cyber mundo

Uno de los objetivos a largo plazo en el diseño del mundo virtual para un Smart Campus es crear un fuerte vínculo con el mundo físico para, por una parte, ayudar a

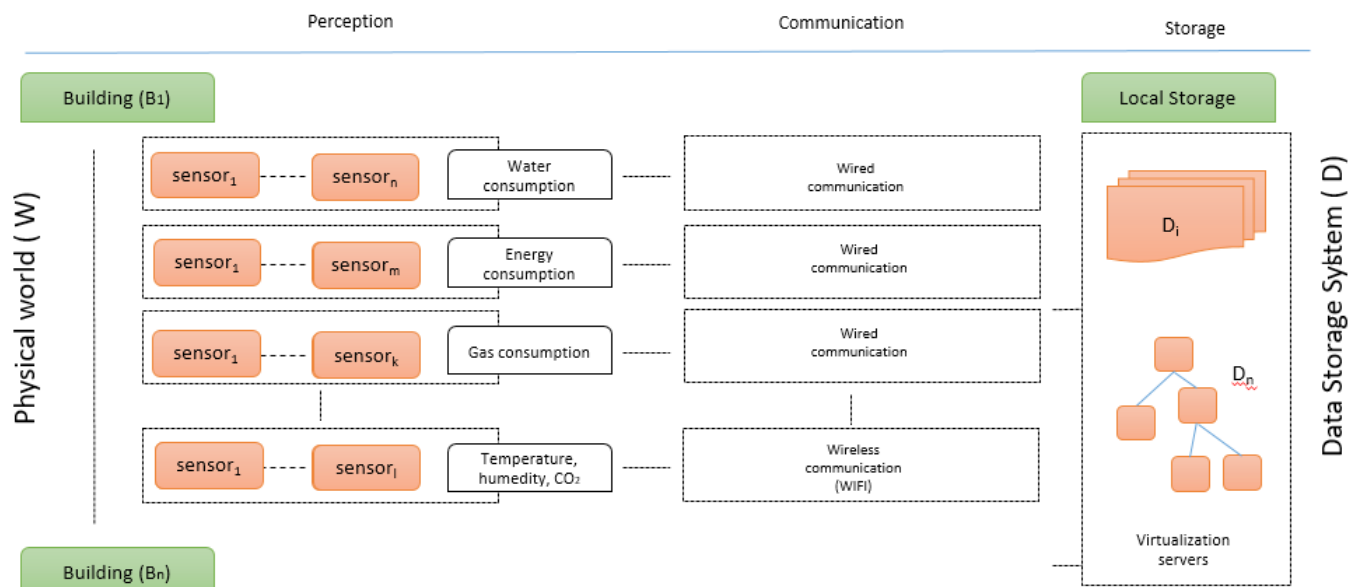


Figura 4. Capa física del SCF SmartPoliTech y su conexión con el subsistema de almacenamiento.



los usuarios en la realización de diversas tareas y por la otra proporcional a entidades reales de un amplio rango de aplicaciones y servicios. Para ello, es necesario proporcionar al mundo virtual con capacidad para no solo acceder al mundo físico, sino también para almacenar datos, procesar dichos datos y ofrecer servicios a diferentes usuarios utilizando diferentes canales. El diseño del mundo virtual requiere de varios subsistemas que se describen a continuación.

### 3.2.1. Sistema de Bases de Datos

Como se vio anteriormente, para mejorar la eficiencia del control del sistema completa y así minimizar los gastos cuando se instalan nuevos dispositivos o se recuperan de fallos en el funcionamiento, el SCF propuesto se esfuerza por optimizar el sistema de almacenamiento de datos adquiridos por el mundo físico  $W$ . El activo más importante es la disponibilidad de los datos, cuya persistencia y relevancia son los factores clave del éxito. Además, un diseño correcto y eficiente de los sistemas de almacenamiento de datos es esencial para el futuro Smart Campus, donde el número de dispositivos es muy elevado y existe una necesidad permanente de ampliarlo con nuevos elementos. Con esta premisa, el sistema de almacenamiento de datos  $D$  está compuesto por dos bases de datos de código abierto con características diferentes y complementarias: la base de datos de series

de tiempo InfluxDB y la base de datos de gráficos Neo4j.

En el caso de la base de datos de series temporales, tenemos que cada serie  $D_i = (D_i^1, D_i^2, \dots, D_i^n)$ , donde  $D_i^n$  es la serie asociada al sensor  $w_j \in W$ . Cada  $D_i^n$  se define como una tupla  $(timestamp, [etiqueta, valor]_n)$ . Este subsistema  $D_i$  acepta consultas a través de una API usando operaciones matemáticas y agrupaciones de tiempo que facilitan el análisis de datos y la recolección de información del Smart Campus. Además, InfluxDB se integra fácilmente con entornos de visualización de código abierto como Grafana (ver Figura 5).

De forma similar, la base de datos basadas en grafo, la base de datos Neo4j facilita el almacenamiento de la información según un contexto espacial a partir de un grafo. El grafo de nuestro SCF  $G_{epcc}(N, E)$  se compone de  $N$  nodos y  $E$  enlaces, que representan, datos y sus relaciones espaciales, respectivamente. La Figura 6 muestra el grafo  $G_{epcc}(N, E)$  de un edificio del Smart Campus.

En nuestro sistema de información jerárquico basado en Neo4j, el nivel superior corresponde al Smart Campus en sí, del que van desglosándose los distintos edificios  $B$ , plantas  $F$ , salas  $R$  y finalmente sensores del mundo físico. Todos ellos con la relación HAS, en el que se definen los espacios que van colgando de cada nodo.

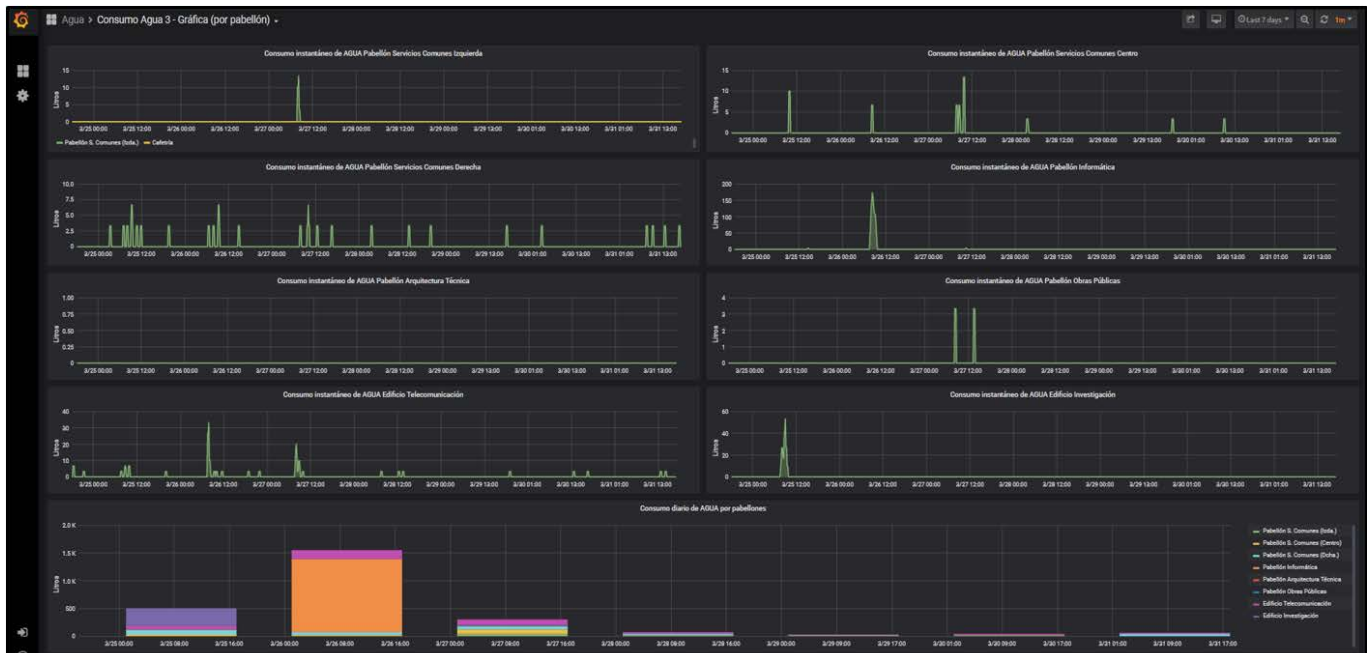


Figura 5. Visor de Grafana para la monitorización de series temporales usadas en SCP.

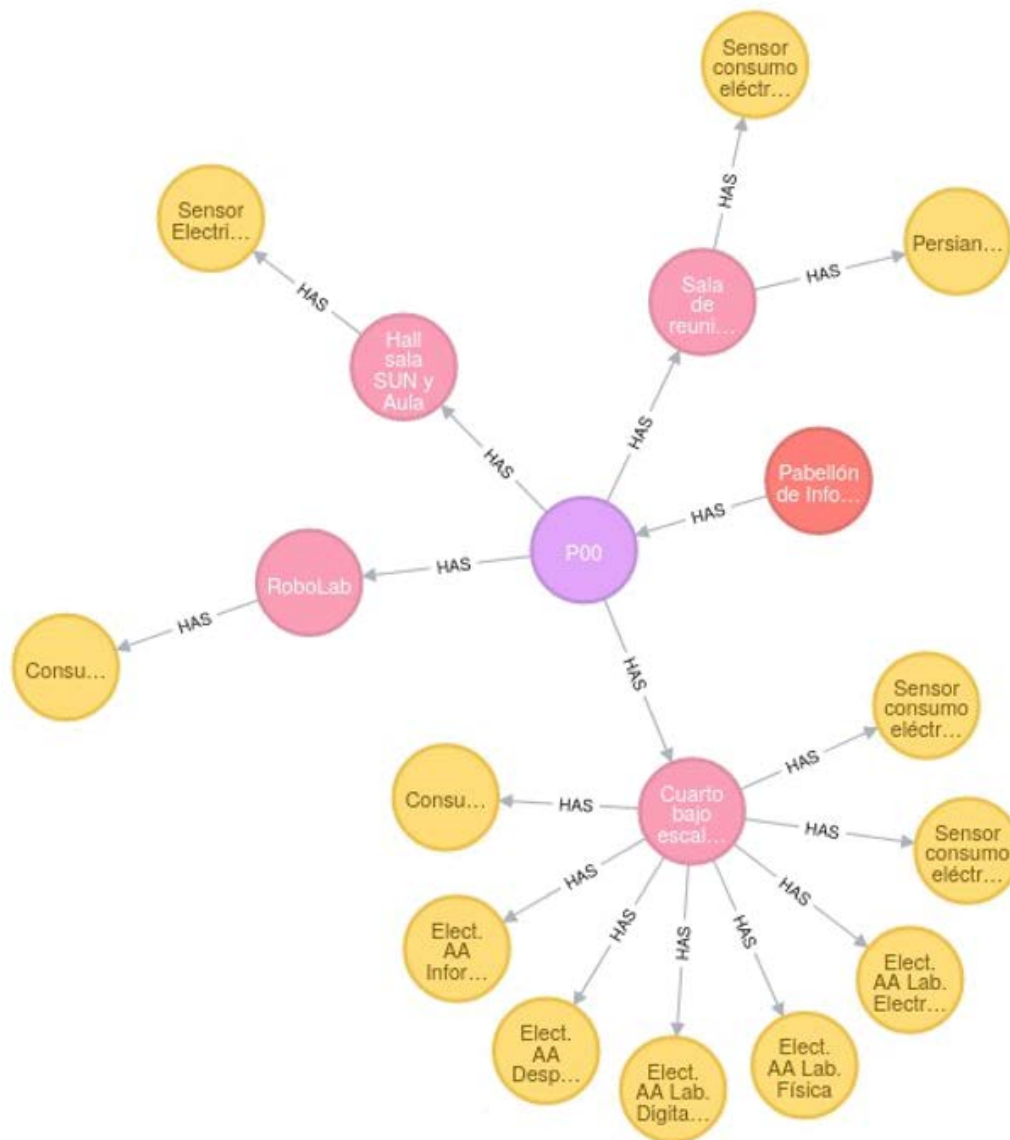


Figura 6. Ejemplo de una vista del grafo Geppc(N, E) del edificio de informática.

### 3.2.2. Bus de servicios ZATO

La información es un factor clave en la prestación de servicios a través de los SCF. En el sistema descrito en este artículo, los datos dinámicos obtenidos de las lecturas en los dispositivos físicos junto con los datos estáticos procedentes de planos, calendarios, inventarios, etc. constituyen el núcleo del sistema de información. Estos datos se ponen a disposición de los usuarios del Smart Campus y de procesos asociados a diferentes equipos. Este gran número de interacciones entre los dispositivos, los humanos y el SCF debe organizarse de forma que sea escalable, eficiente y fiable. La elección aquí ha sido utilizar una Arquitectura Orientada a

Servicios (SOA), donde se proporcionan múltiples servicios a través de una fuente abierta, basada en Python: el bus de servicio Zato. Un ESB facilita la comunicación entre los agentes de software, mientras que integra y gestiona múltiples fuentes de información con diferentes métodos de acceso (9).

Sea  $Q$  el conjunto de  $K$  servicios proporcionados por nuestro SCF,  $Q = (q_1, q_2, \dots, q_K)$ . Cada servicio  $q_i$  implementa una función  $f_i$  y tiene una tasa de activación máxima  $d_i$  que denota la frecuencia con la que se solicita este servicio  $q_i$  (e.g., los dispositivos físicos utilizan un servicio específico para almacenar datos cada periodo de tiempo). Los servicios ofrecidos a través de Internet

utilizan el protocolo HTTP mediante la creación de un canal HTTP plano específico  $c_i$  que acepta invocaciones de servicios HTTP síncronos. Específicamente con Zato se utilizan varios canales REST que requieren un identificador y la ruta para montar este canal en la URL especificada para tal efecto. Los canales HTTP simples en Zato no esperan que los datos estén en un formato particular, puede ser cualquier elemento que pueda ser transferida a través de HTTP, incluyendo JSON. La Figura 7 ilustra una visión general de cómo se gestionan los servicios en esta propuesta.

La creación de servicios específicos en una SOA no es una tarea compleja. De hecho, una de las principales ventajas de este sistema es su alta escalabilidad y flexibilidad cuando se requieren nuevos servicios. Los siguientes servicios son ejemplos de algunos de los desplegados por el EBS de Zato dentro del SCF SmartPoliTech: i) insertar datos de los sensores en las base de datos; ii) recoger datos de la base de datos para acceso por usuario/aplicación; iii) servicios de visualización de los datos a través de visores específicos; iv) servicios específicos para la detección de consumo inadecuado de agua/luz/gas...

### 3.2.3. Visualización de datos

Uno de los principales objetivos del SCF descrito en este trabajo, además de recoger datos sobre las variables que afectan a la eficiencia energética en el Smart

Campus, es poner estos datos a disposición de los usuarios de los edificios. El hecho de que los habitantes del Smart Campus puedan conocer en tiempo real el uso que están haciendo de los recursos críticos (por ejemplo, el consumo de agua o de electricidad) puede ser utilizado para hacerles conscientes de su propia responsabilidad y contribución a la sostenibilidad ambiental, contribuyendo a transformar a los usuarios del Smart Campus en ciudadanos inteligentes.

Por lo general, un sistema de visualización bien diseñado facilita los diseños de aplicaciones de alto nivel. Entre estas cuestiones de diseño, es importante que el sistema supervise los dispositivos físicos y la infraestructura para asegurar un funcionamiento estable y adecuado, y también que apoye la adopción de decisiones en tiempo real mediante la combinación de múltiples fuentes de datos en un visualizador específico. Por esta razón, el SCF propuesto en este documento define el sistema de visualización  $V$ , que se compone de dos herramientas de visualización diferentes. La primera se basa en la herramienta de visualización de código abierto Grafana (ver Figura 5), específica para el seguimiento y análisis de series temporales. La segunda se basa en un visor de mapas interactivo de las instalaciones del Smart Campus, específico para el acceso a la base de datos de Neo4j.

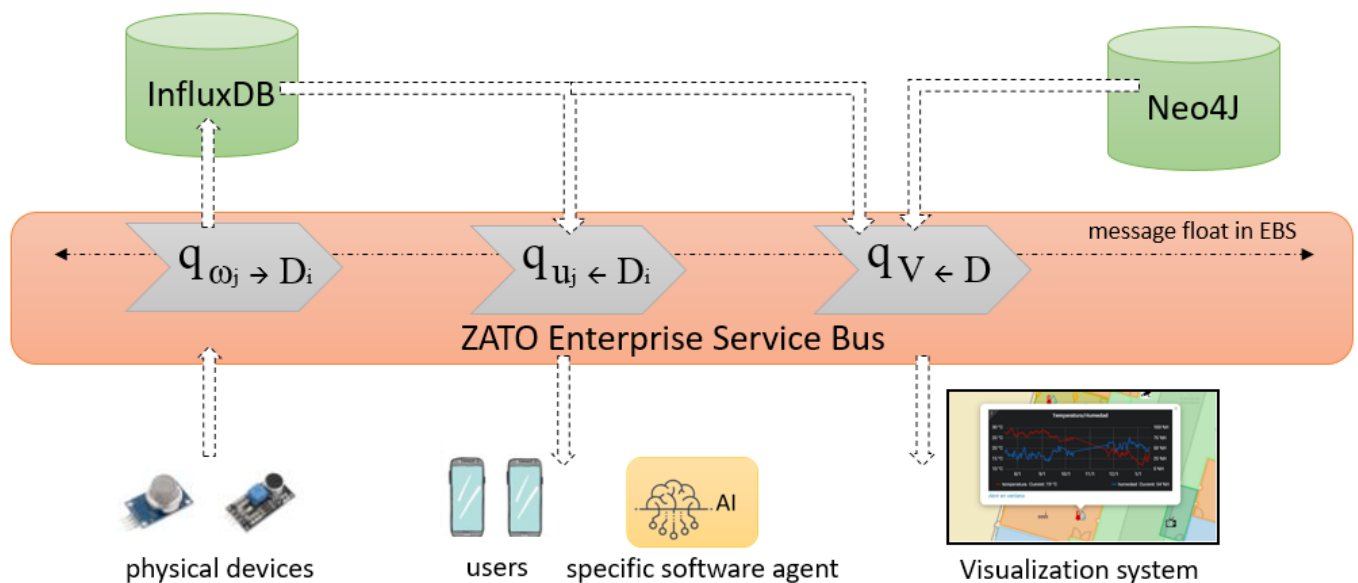


Figura 7. Bus de servicios Zato y relaciones entre los distintos módulos.

## 4. Discusión y conclusiones

El SCF presentado en este artículo se desplegó desde 2013, aunque su evolución hasta el sistema actualmente presentado ha sido continua. En su estado actual SmartPoliTech ha desarrollado diferentes servicios sobre ZATO que facilitan políticas de concienciación de sus usuarios a través de los sistemas de visualización o mediante generación automática de alarmas que registran en tiempo real fallos en el sistema, facilitando actuar sobre estos errores con un tiempo de respuesta relativamente bajo. La formalización del concepto SCF como se presenta en este artículo facilita, igualmente, una comprensión general del sistema que permita el desarrollo de nuevos servicios con objetivos independientes.

## Bibliografía

- (1) Wang, Y., Saez, B., Szczechowicz, J., Ruisi, J., Kraft, T., Toscano, S., Vacco, Z., and Nicolas, K.A. (2017). SmartCampus Internet of Things Framework. *Proceedings of IEEE Ubiquitous Computing, Electronics and Mobile Communication Conference*.
- (2) Alghamdi, A., and Shetty, S. (2016). Survey toward a SmartCampus using the internet of things. *Proceedings of the IEEE 4th International Conference on Future Internet of Things and Cloud*, 235–239.
- (3) Sánchez, A.; Barrena, M.; García, P.; Montalbán, B. and Bustos, P. SmartPolitech: Un experimento en inmótica social. *XXII Jornadas de Ingeniería del Software y Base de Datos*, 2017
- (4) InfluxData Home Page. 2020. <https://www.influxdata.com/>
- (5) Neo4j Home Page. 2020. <https://grafana.com/>
- (6) ZatoESB Home Page. 2020. <https://zato.io/>.
- (7) Grafana Home Page. 2020. <https://www.influxdata.com/>.
- (8) Alam, Kazi Masudul & El Saddik, Abdulmotaleb. (2017). C2PS: A Digital Twin Architecture Reference Model for the Cloud-based Cyber-Physical Systems. *IEEE Access*, 1-1. 10.1109/AC-CESS.2017.2657006.
- (9) Chaudhari, N.; Singh, R. and Prasad, S. (2016) Information handling and processing using enterprise service bus in service oriented architecture system. *8th International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks*.

# Monitorización energética de la ETSIT de la Universidad Politécnica de Madrid

Análisis para la gestión de la demanda

ROBOLABO - E.T.S.I. Telecomunicación. UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID (UPM)

**Á. Gutiérrez (1)**

(1) Dr. Ingeniero de Telecomunicación. Prof. Titular de Universidad. Laboratorio de Robótica y Control (Robolabo). E.T.S. Ingenieros de Telecomunicación, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España

Persona de contacto/Corresponding author: [a.gutierrez@upm.es](mailto:a.gutierrez@upm.es) (Á. Gutiérrez)  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8926-5328>

## Monitorización energética de la ETSIT de la Universidad Politécnica de Madrid. Análisis para la gestión de la demanda

### RESUMEN

Este trabajo presenta un sistema de monitorización energética en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación de la Universidad Politécnica de Madrid. Se ha diseñado, desarrollado e integrado un sistema de monitorización en diferentes edificios. El sistema de monitorización obtiene los datos de consumo y generación fotovoltaica de las infraestructuras para su posterior almacenamiento. Tras su almacenamiento, son representados y mostrados a través de un portal web. Además, estos datos se utilizan para el modelado y análisis del comportamiento de los edificios. En concreto, se realiza un estudio de autoconsumo y factor de cresta de las instalaciones.

**Palabras clave:** Monitorización; Energía; Gestión de la demanda; Visualización

## *Energy Monitoring at the ETSIT School of the Universidad Politécnica de Madrid. Analysis for demand-side management*

### ABSTRACT

*This paper presents an energy monitoring system at Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación of Universidad Politécnica de Madrid. An integrated monitoring system has been designed, developed and integrated in the different buildings. The monitoring system obtains the consumption and photovoltaic generation data of the different buildings for its later storage. These data are presented in a web site and used for the modelling and behavioural analysis of the buildings. Specifically, a self-consumption and crest factor analysis is implemented.*

**Keywords:** *Monitoring; Energy; Demand-Side Management; Visualization*

# 1. Introducción

Este artículo se centra en un sistema de monitorización instalado en 5 edificios de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación (ETSIT). Los 5 edificios permiten disponer de información de tres tipos de perfiles diferentes: un entorno residencial, centro de investigación y un entorno de oficinas. El sistema de monitorización adquiere variables energéticas en tiempo real que posteriormente procesa e incorpora a una base de datos para su análisis y visualización en tiempo real.

## 2. Sistema de monitorización

### 2.1. Sistema

El sistema de monitorización es un diseño propietario desarrollado a medida para los objetivos de monitorización de sistemas energéticos. Se basa en una comunicación alámbrica mediante modbus sobre bus serie RS-485 a 2 hilos en la que hay un controlador central (TjMon) y diferentes nodos (S-DINs) (ver Figura 1).

Cada nodo dispone de un sistema operativo en tiempo real que permite la adquisición de las variables cada 10 milisegundos. Los nodos que se incluyen en el presente estudio son analizadores de red (SDIN-METER-3PH) y se encargan de obtener diferentes variables energéticas periódicamente (tensión, corriente, frecuencia, potencia activa, potencia reactiva, energía activa, energía reactiva, y el factor de potencia) de cada una de las líneas trifásicas. Cada segundo, el nodo incorpora esas variables a sus tablas internas para el acceso desde el exterior a través del protocolo RS-485 RTU-Modbus.



Figura 1. (a) TjMon y (b) SDIN-METER-3PH.

El controlador principal (TjMon) se basa en un sistema operativo Linux embebido. Incorpora un microcontrolador con un sistema de alimentación ininterrumpida (SAI) y una tarjeta periférica para conectarse con los nodos S-DINs. Cada minuto, el TjMon adquiere todas las medidas de los nodos y las almacena localmente, junto con la fecha y la hora, en una tarjeta SD. Además, cada 10 minutos el TjMon envía los datos almacenados al servidor de monitorización. En el servidor, un programa periódico se encarga de comprobar si se han sincronizado datos nuevos, y de ser así inserta los datos en las tablas de las bases de datos predefinidas. Dichas tablas se encuentran divididas en dos grandes bloques, potencia y energía. Posteriormente, los resultados se presentan en una web privada para el análisis de los mismos. La visualización permite navegar para obtener medidas de energía diarias o mensuales durante todo el periodo de monitorización. Con respecto a las medidas de potencia, permite obtener información discretizada cada minuto sobre el consumo instantáneo de cada una de las líneas monitorizadas.

### 2.2. Edificios

La ETSIT-UPM está dividida en cuatro edificios principales (A, B, C y D, ver Figura 2). El Edificio A es un edificio mixto, con aulas, despachos, zonas de investigación, cafetería y biblioteca. El Edificio B incluye solo aulas y despachos. Finalmente, los edificios C y D son fundamentalmente despachos docentes y laboratorios de investigación. Además, al sistema de monitorización se incorpora la vivienda solar autosuficiente MagicBox (ver Figura 2e). Se trata de una casa bioclimática, energéticamente autosuficiente, construida con materiales cerámicos y reciclables, desarrollada por la UPM para participar en el concurso Solar Decathlon celebrado en EEUU en el año 2005 [1]. Cuenta con módulos fotovoltaicos situados tanto en las paredes como en el tejado. Este prototipo constituye un claro ejemplo de autosuficiencia energética mediante el uso de la energía solar y un correcto aislamiento.



Figura 2. (a) Edificio A, (b) Edificio B, (c) Edificio C, (d) Edificio D y (e) la vivienda solar autosuficiente MagicBox de la ETSIT-UPM.

### 2.3. Líneas monitorizadas

Actualmente existen 22 líneas de consumo, sin contar la vivienda Magicbox, que se encuentran monitorizadas.

Estas líneas se dividen conforme a la Tabla 1, donde se muestran los consumos máximos teóricos de las líneas, en base a su protección, y los transformadores instalados para la medida de las mismas. Además, se están monitorizando las 6 líneas de generación fotovoltaica existentes en la ETSIT-UPM, sin tener en cuenta la vivienda Magicbox, tal y como se muestran en la Tabla 2. Por último, la vivienda Magicbox se encuentra monitorizada en su totalidad. Concretamente se han monitorizado las líneas generales de consumo y generación, así como una separación de 8 líneas internas de consumo, tal y como se muestra en la Tabla 3.

El diseño de la monitorización se ha tenido en cuenta en base a los estudios de gestión de la demanda realizados previamente [2-5]. Por un lado se miden líneas generales, tanto de consumo como de generación, así como la conexión con la red eléctrica. Por otro lado, se han dividido los consumos en diferibles, no diferibles y elásticos:

- Los consumos no diferibles son aquellos que no pueden ser utilizados en la gestión de la demanda, como el frigorífico o la iluminación, entre otros.
- Los consumos diferibles son aquellos que permiten al usuario realizar un control de las cargas para desplazar las mismas de un instante de tiempo a otro.
- Los consumos elásticos son los que no permiten un desplazamiento en el tiempo, pero sí un control de la potencia consumida.

Todas las líneas monitorizadas se muestrean periódicamente cada minuto por el sistema de monitorización, y los datos se sincronizan cada 5 minutos con el servidor de datos y la web (ver Figura 3).

Tabla 1. Líneas de consumo monitorizadas.

Ubicación	Descripción	Protección	Transformador
Edificio A	Cabecera	1250 A	1000:5
Edificio A	Aire Acondicionado	400 A	400:5
Edificio A	Cafetería	400 A	200:5
Edificio A	Biblioteca	100 A	100:5
Edificio A	AC biblioteca	160 A	150:5
Edificio B	Cabecera	800 A	800:5
Edificio B	Aire Acondicionado	250 A	250:5
Edificio C	Cabecera	1600 A	1000:5
Edificio C	ISOM	630 A	600:5
Edificio C	Aire Acondicionado	630 A	400:5
Edificio C	Planta baja	100 A	50:5
Edificio C	Planta 1 Este	250 A	100:5
Edificio C	Planta 1 Oeste	250 A	75:5
Edificio C	Planta 2 Este	250 A	100:5
Edificio C	Planta 2 Oeste	250 A	100:5
Edificio C	Planta 3 Este	250 A	100:5
Edificio C	Planta 3 Oeste	250 A	100:5
Edificio C	Alumbrado exterior	100 A	50:5
Edificio D	Cabecera	630 A	300:5
IES	Planta baja	300 A	200:5
IES	Planta 1	100 A	50:5
IES	Planta 1	300 A	100:5



Tabla 2. Líneas de generación PV monitorizadas.

Ubicación	Descripción	Potencia
Edificio C	Fachada planta 1	5 kW
Edificio C	Fachada planta 2	2x2 kW
Edificio C	Fachada planta 3	2x2.5 kW
Edificio C	Fachada planta 4	10 kW
IES	Fachada	3 kW
IES	Planta 1	5 kW

Tabla 3. Líneas de consumo de MagicBox.

Tipo	Descripción
General	Conexión a red
General	Generación fotovoltaica
General	Consumos de la vivienda
Agrupaciones	Cargas diferibles
Agrupaciones	Cargas no diferibles
Agrupaciones	Coche eléctrico
Diferibles	Lavadora
Diferibles	Lavavajillas
Diferibles	Secadora
Elásticas	Aire Acondicionado este
Elásticas	Aire Acondicionado oeste

### 3. Análisis de datos

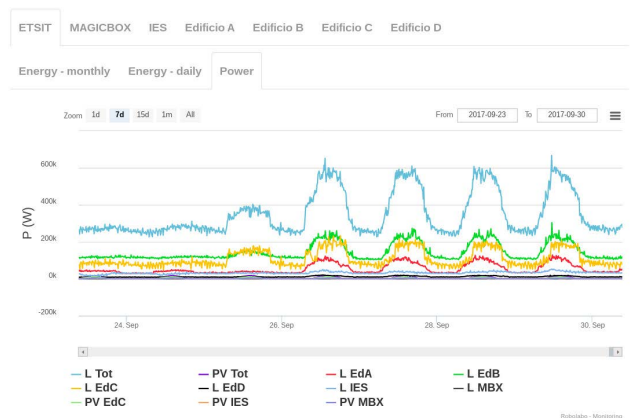
Gracias al sistema de monitorización, se ha realizado un estudio detallado los perfiles de consumo y generación de los diferentes usuarios de la ETSIT.

En concreto, para reducir la variabilidad existente en el sistema eléctrico de la ETSIT, es necesario evaluar el uso del recurso local de las diferentes instalaciones. Para ello se define el coeficiente de autoconsumo ( $\xi$ ), como la cantidad de energía consumida localmente que es suplida por fuentes de generación local, cuya expresión matemática puede observarse en la Ecuación 1:

$$[1] \quad \xi (\%) = \frac{E_{FV,C}}{E_{CE}} \cdot 100 \Big|_T$$



(a)



(b)

Figura 3. Visualización de la web mediante medidas de energía (a) y de potencia (b).

donde,  $E_{FV,C}$  es la cantidad de energía generada que suplir la demanda local para un tiempo de evaluación  $T$  y  $E_C$  es la cantidad de energía consumida total durante el periodo de tiempo  $T$ . Este coeficiente sirve para evaluar la cantidad de consumo que el generador instalado es capaz de cubrir con su electricidad generada.

La Figura 4 muestra los resultados de evaluación de  $\xi$  para dos periodos de evaluación distintos: diario,  $\xi_d$  (ver Figura 3a), y mensual,  $\xi_m$  (ver Figura 3b) en los edificios con generación fotovoltaica.

En ambos periodos de evaluación, se observa que la instalación que consigue un mejor valor de coeficiente de autoconsumo es Magicbox. Se observa que es capaz de suplir de manera diaria cerca del 40% en media de la demanda local diaria. Mientras que de mane-

ra mensual en media se ha cubierto el 38.75% de la demanda local. Esto se debe, entre otros factores, a la disponibilidad de un generador diseñado para cubrir las necesidades del usuario. Además, el sistema de automatización disponible en algunos de los electrodomésticos de la casa, permite modificar el perfil de consumo de este usuario para adaptarse al perfil de generación fotovoltaico. De esta manera gracias a técnicas de gestión de la demanda se obtiene un mayor ratio de autoconsumo.

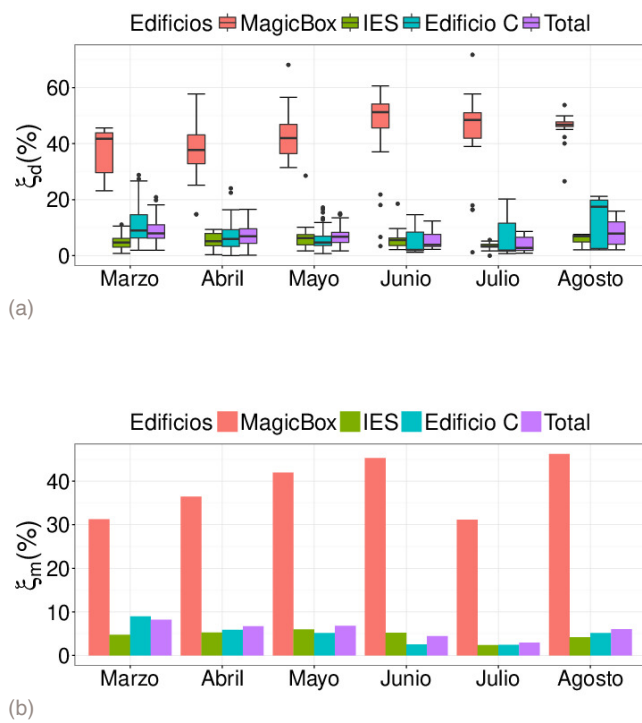


Figura 4. Evaluación del coeficiente de autoconsumo para las diferentes instalaciones que componen la ETSIT (a) diario y (b) mensual.

El resto de instalaciones obtienen un ratio de autoconsumo menor en ambos periodos a pesar de que la totalidad de energía generada se utiliza para alimentar las cargas. Sin embargo, debido a que la cantidad de energía generada es inferior a la demandada, el autoconsumo que se puede alcanzar en estas instalaciones está limitado y depende de la cantidad consumida, a pesar que su utilización sea del 100%. Por ejemplo, en el Edificio C los ratios medios de autoconsumo alcanzados son de 8.08% diariamente y 5.03%

mensualmente. En este caso, la diferencia existente entre ambos coeficientes se debe a la variabilidad que presenta el consumo del edificio.

Finalmente, si se analizan el conjunto de los consumos en la microrred de la ETSIT obtenemos un autoconsumo medio diario de 6.85% y un autoconsumo medio mensual de 5.85%. A pesar de que se está utilizando la totalidad de la energía generada, ésta no es suficiente para suplir la demanda actual de dichos edificios. Además estos consumos presentan una gran variabilidad por lo que resulta difícil poder modificarlos para reducir dicha variabilidad sin aumentar el consumo en los valles.

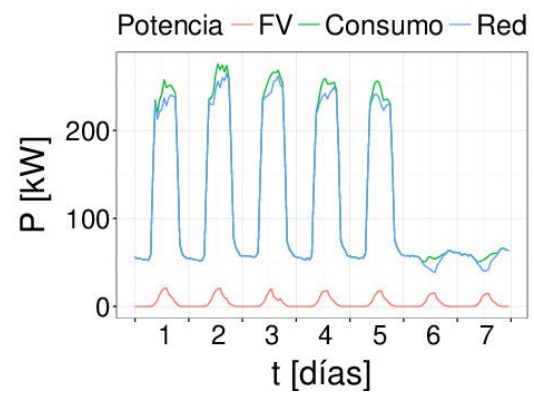


Figura 5. Flujos de potencia del consumo agregado de la ETSIT-UPM.

Un ejemplo del comportamiento actual del consumo agregado de la ETSIT puede verse en la Figura 5. En dicha Figura, se observa en rojo la potencia FV generada, en verde la potencia consumida y en azul la potencia que es consumida de la red eléctrica. En este caso, la generación local ayuda a reducir los picos en los días laborales. Sin embargo, durante los fines de semana, dado que el consumo no presenta variabilidad, el efecto de la generación deforma el consumo y aumenta dicha variabilidad. En consecuencia, es necesario definir un coeficiente para evaluar dicho comportamiento y cuantificar el efecto de la generación local en la forma del consumo. Para ello, el coeficiente utilizado es el factor de cresta  $F_C$ , cuya definición se encuentra en la Ecuación 2 y consiste en evaluar la relación entre el pico de consumo con respecto a su valor cuadrático medio.

$$[2] \quad F_C = \frac{|P_{max}|}{P_{rms}} \Big|_T$$

donde,  $|P_{max}|$  es el valor absoluto del consumo máximo dentro del periodo de evaluación  $T$  y  $P_{rms}$  es el valor cuadrático medio del consumo en el periodo  $T$ .

El valor ideal del  $F_c$  para un consumo plano es 1, pero en la realidad este número se encuentra alejado de su valor ideal.

Para analizar el  $F_c$ , el estudio consiste en aumentar la energía generada localmente para ver cómo afectaría a la forma del consumo. Para ello, se variará la energía generada a través del coeficiente de penetración de energía FV ( $\rho^{PV}$ ), el cual varía desde la ausencia de energía fotovoltaica ( $\rho^{PV}=0\% \rightarrow E_G=0$ ) hasta que la cantidad de energía generada sea igual que la energía consumida ( $\rho^{PV}=100\% \rightarrow E_G=E_C$ ). A la vez, también se analiza el  $\xi$  que se puede obtener en cada uno de los casos.

En la Figura 6 se encuentran los resultados del factor de cresta y el factor de autoconsumo para distintos porcentajes de energía generada. Se han evaluado ambos coeficientes para distintos periodos de evaluación: diario, semanal y mensual. En rojo se encuentra el  $F_c$  y en azul los valores de  $\xi$ . El valor representado en la gráfica es el valor medio por periodo de evaluación mientras que en gris podemos observar la desviación típica de los factores.

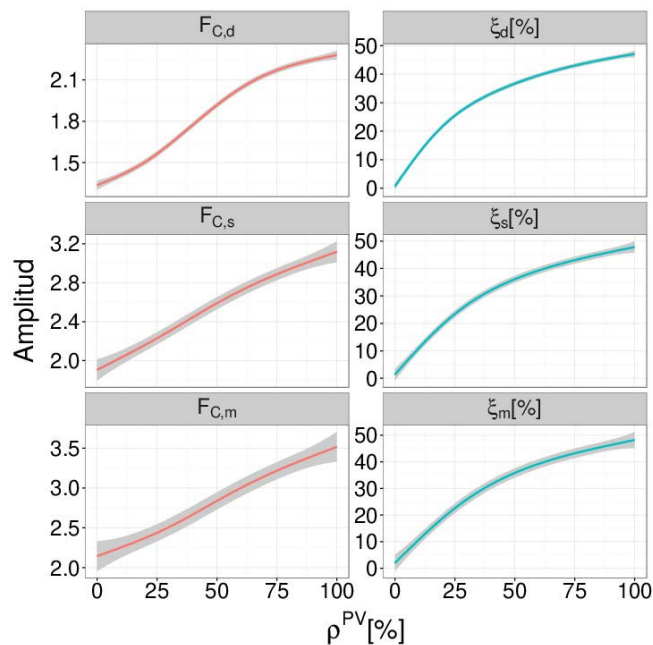


Figura 6. Evaluación del factor de cresta y el coeficiente de autoconsumo en función de la cantidad de energía generada.

Tabla 4. Resultados del factor de cresta y autoconsumo para los porcentajes de penetración fotovoltaica.

Periodo	$\rho^{PV} = 0\%$		$\rho^{PV} = 5\%$		$\rho^{PV} = 100\%$	
	$F_c$	$\xi$ [%]	$F_c$	$\xi$ [%]	$F_c$	$\xi$ [%]
Diario	1.34	0.00	1.37	6.66	2.27	46.92
Semanal	1.94	0.00	1.98	5.89	3.09	47.57
Mensual	2.23	0.00	2.23	5.65	3.47	47.79

En primer lugar, se puede observar como el  $F_c$  aumenta conforme aumenta la cantidad de energía generada localmente. Dada la peculiar forma del perfil de consumo, se observa una gran diferencia entre los días laborales y los no laborales. Debido a esta diferencia entre los distintos días, el  $F_{c,d}$  presenta una tendencia distinta a la de los  $F_{c,s}$  y  $F_{c,m}$ . El  $F_{c,d}$  tiene un crecimiento logarítmico mientras que el de los  $F_{c,s}$  y  $F_{c,m}$  presenta un crecimiento lineal. En ausencia de generación local los factores de cresta tienen un valor inicial de: 1.34 diario, 1.94 semanal y 2.23 mensual. Sin embargo, al introducir generación fotovoltaica, la forma del perfil se deforma hasta un máximo de: 2.27 diario, 3.09 semanal y 3.47 mensual. En el caso actual de la ETSIT, la totalidad de sus generadores producen alrededor de un 5% y los factores de cresta alcanzados se encuentran recogidos en la Tabla 4.

En cuanto al autoconsumo, en cualquier periodo de evaluación obtenemos resultados similares. A medida que crece la disponibilidad de energía generada también lo hace su autoconsumo de manera logarítmica en todos los periodos hasta un máximo de alrededor del 47%. En el caso de la actual capacidad de generación obtenemos un autoconsumo alrededor del 6%. Todos estos resultados pueden consultarse en la Tabla 4. Como conclusión que se desprende de estos resultados, se puede ver que a medida que se aumenta la generación local, una mayor cantidad de energía consumida es cubierta. Por lo que el autoconsumo aumenta, pero a la vez el perfil de consumo se deforma incrementando su variabilidad, siendo necesario gestionar el consumo para reducirla.

En la Figura 7 se encuentran los resultados de variar la cantidad de energía generada localmente ( $\rho^{PV}$ ) y la cantidad de energía consumida que se puede gestionar dentro de la instalación ( $\rho^{DSM}$ ). En este caso, el algoritmo

de gestión de la demanda consiste en desplazar un porcentaje de energía diferible dentro de las horas generación siguiendo dicho perfil de generación.

En estos resultados se puede observar que para una  $\rho^{PV}$  fija, a medida que  $\rho^{DSM}$  crece, el FC decrece hasta su mínimo que coincide para  $\rho^{PV} = \rho^{DSM}$ . Después de dicho punto el  $F_c$  vuelve a crecer, pero a un ritmo menor y alcanza factores de cresta aproximadamente un 10% menores a los alcanzados anteriormente para todos los periodos de evaluación. Por lo tanto, la gestión de la demanda ayuda a reducir la variabilidad introducida por la generación local.

Analizando los resultados del factor de autoconsumo de la Figura 6b, se puede observar que la gestión de la demanda favorece un mayor aprovechamiento del recurso local. A medida que la generación local crece,

el aumento de  $\rho^{DSM}$  hace que  $\xi$  crezca, obteniendo mayores cuotas de utilización de la energía generada localmente. Alcanzándose un  $\xi$  máximo del 100% cuando el  $\rho^{PV} = \rho^{DSM} = 100\%$ . Se observa también como para un  $\rho^{PV} > 25\%$ , al producirse un exceso de generación, la gestión de la demanda ayuda a incrementar el uso de la energía generada localmente a medida que se dispone de mayor cantidad de consumo diferible.

Por debajo de  $\rho^{PV} < 25\%$  se consume toda la energía generada pero representa un porcentaje inferior de la cantidad de energía consumida. Podemos concluir que el crecimiento de los generadores locales debe ir acompañado de técnicas de gestión de la demanda para no solo incrementar su uso sino también favorecer una mejor integración de los generadores y reducir su impacto en la forma del perfil de consumo que ve la red eléctrica.

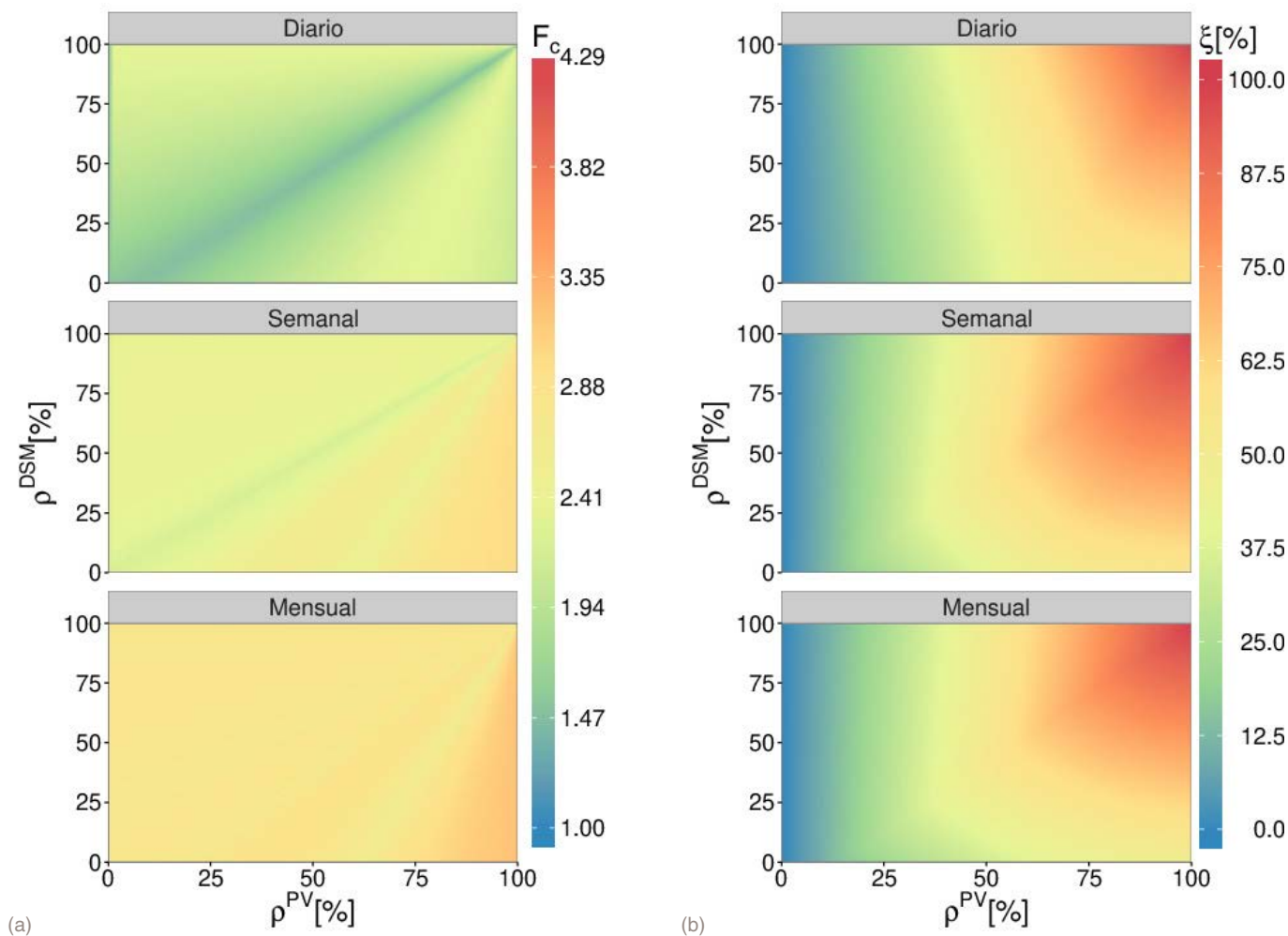


Figura 7. Resultados de la variación de la cantidad de energía generada localmente y la capacidad de gestión del consumo de la ETSIT: (a) factor de cresta y (b) factor de autoconsumo.

## 4. Conclusiones

En este trabajo se ha presentado un sistema de monitorización energética en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación de la Universidad Politécnica de Madrid. La monitorización ha permitido estudiar y elaborar una base de datos de los distintos consumos que conforman parte de la microrred interna de la ETSIT. Además se han analizado diferentes técnicas y cómo influyen en la reducción de la variabilidad del consumo de la ETSIT.

En concreto, se ha estudiado el efecto del uso de generación local para la reducción de la variabilidad del perfil de consumo. Se ha variado la cantidad de energía generada y se ha visto que al aumentar su capacidad de generación se deforma cada vez más el perfil de consumo aumentando la distancia del consumo máximo con respecto a su valor cuadrático medio. Por otro lado, en términos energéticos, aumentando la potencia de generación se podría conseguir cubrir como máximo la mitad de la energía consumida en esta microrred.

Como la variabilidad crece con el aumento del tamaño del generador, se ha decidido estudiar el efecto de una primera aproximación de técnicas de gestión de la demanda junto con diferentes tamaños de generación. En este caso, se ha optado por utilizar un algoritmo de gestión de la demanda que desplaza un porcentaje de energía consumida y sigue el perfil de generación desplazando dicha energía a las horas de generación. Así pues, con la combinación de ambos elementos no solo se consigue reducir la variabilidad en aproximadamente un 20% sino que también se permite un mejor aprovechamiento de las fuentes de generación local, incrementando el autoconsumo y favoreciendo una mejor integración del generador local.

## Bibliografía

- (1) Gutiérrez, A. ; Jiménez-Leube, J.; Magdalena, L. (2009). A Distributed Sensor Network for the Control of a Bioclimatic House in Spain. *Sensors* 9(10), pages 8197-8214.
- (2) Castillo M., Gutiérrez Á., Monasterio-Huelin F., Caamaño E., Masa D. y Jiménez-Leube J. (2011). A Semi-Distributed Electric Demand-Side Management System with PV Generation for Self-Consumption Enhancement. *Energy Conversion and Management*, 52 (7), 2659-2666.
- (3) Matallanas E., Castillo-Cagigal M., Gutiérrez Á, Monasterio-Huelin F., Caamaño-Martín E., Masa D. and Jiménez-Leube. Neural F. (2012). Network Controller for Active Demand Side Management with PV Energy in the Residential Sector. *Applied Energy*, 91(0), 90-97.
- (4) Castillo-Cagigal M., Matallanas E., Caamaño-Martín E., and Gutiérrez Á. (2018). SwarmGrid: Demand-Side Management with Distributed Energy Resources Based on Multifrequency Agent Coordination. *Energies*, 11(9), 2476.
- (5) Matallanas E., Castillo-Cagigal M., Caamaño-Martín E. and Gutiérrez Á (2019). Neural Controller for the Smoothness of Continuous Signals: an Electrical Grid Example. *Neural Computing and Applications*, 32(0), 5745–5760,

# La digitalización de la energía y el confort como motor de transformación energética

Stechome

**L.M. Sanchez (1)**

(1) Luis María Sánchez García. Gerente y responsable de negocio de Stechome. Presidente de Asociación vasca de gestores energéticos (Aprobasge) y responsable de proyecto de la Federación Nacional de Gestores energéticos (Fenage)

Persona de contacto: Luismariasanchezgarcia@gmail.com (L.M. Sánchez)

## La digitalización de la energía y el confort como motor de transformación energética

### RESUMEN

Enfoque actualizado sobre la importancia de la monitorización para los procesos de empoderamiento frente a la energía de las familias y consumidores y reflejo de la situación actual de los procesos de monitorización, los agentes que participan y su relación con el mercado y las necesidades reales del mismo. Planteamiento de los retos de la monitorización y del uso de los datos como motor de cambio en el modelo energético actual

**Palabras clave:** Digitalización de la energía, empoderamiento, transformación energética, pobreza energética



## 1. La digitalización de la energía y el confort como motor de transformación energética

El siguiente artículo nos gustaría exponer y desarrollar diferentes aspectos que suelen quedar fuera de los ámbitos técnicos y científicos y entendemos que son de gran importancia para colocar en el lugar que le corresponde a los datos y la monitorización del consumo, coste y comportamientos energético. Del mismo modo queremos exponer la importancia que tiene la divulgación de los datos en un formato comprensible para las familias de cara a la sensibilización y el empoderamiento frente a la energía.

Y por último abordaremos los retos principales que hay en el entorno de la monitorización relacionada con el confort tanto en el aspecto técnico como del tratamiento de la información o su comprensión por parte de las familias.

Si tomamos alguna de las definiciones más extendidas del concepto ENERGIA como la capacidad que tiene la materia de producir trabajo en forma de movimiento, luz, calor, etc. o la capacidad y fuerza para actuar física o mentalmente y le añadimos la definición de DIGITALIZACION como la acción de digitalizar o registrar datos en forma digital convirtiendo o codificando en dígitos aquellos datos o informaciones de carácter continuo, como una imagen fotográfica, un documento o un libro tenemos una aplicación directa y efectiva de lo que la tecnología puede hacer para reducir la demanda energía y mejorar la sostenibilidad.

Cuando se habla de DIGITALIZACION ENERGETICA, siempre se enfocan estos temas hacia la producción energética y hacia la instalación de equipos de medición de consumo. Hoy queremos lanzar un mensaje diferente y cambiar la utilidad de ese concepto para hablar de una poderosa herramienta que al servicio del usuario puede transformar el modelo energético.

Trasladar al usuario la información de su consumo a tiempo real, aplicarle el coste correspondiente y compararle con otros consumidores similares genera una reducción del consumo superior al 10%. En diferentes pruebas realizadas, así como en varios proyectos reales donde los usuarios han cambiado el modelo de gestión de su información, el resultado ha sido un cambio

total en el comportamiento energético y una importante rebaja en la factura energética de las familias. Únicamente por trasladarles a tiempo real el coste de su confort y demanda.

Cuando el usuario puede controlar de manera directa su comportamiento y la información se transmite de una manera entendible, el consumidor es capaz de adaptar sus hábitos y consumir de una manera más sostenible.

Hoy en día, hacer tangible la energía es relativamente sencillo y barato. Es necesario crear los acuerdos necesarios entre usuarios y consumidores de un mismo edificio para poder tomar el control de cualquier tipo de suministro, sea electricidad o gas natural y hacerlo además independientemente de la compañía comercializadora que nos lo suministre.

Si tenemos equipos de medida preparados para dar el paso hacia la digitalización, *¿a quién le preocupa que los usuarios sean conscientes del impacto de su consumo?*

Está claro que dentro del sector energético existen intereses contrapuestos, pero el cambio de modelo solo pasa por que el usuario tome el poder y utilice las herramientas que tenga a su alcance, en este caso la tecnología y las herramientas de digitalización.

## 2. El empoderamiento frente a la energía

La energía o más bien los costes energéticos han tomado una importante relevancia en la sociedad de hoy en día. Los consumidores de energía y más concretamente las familias requieren un mayor control sobre sus consumos. La llamada pobreza energética y la necesidad de controlar y optimizar la factura energética requieren soluciones sencillas, tangibles y accesibles a toda la sociedad.

Por otro lado, el desarrollo tecnológico y la incorporación de soluciones “Smart” en los edificios y más especialmente en lo relacionado con el consumo y la producción energética no ha sido capaz de transferir o aportar todas sus ventajas o posibilidades al ciudadano.

Son estos dos fundamentos, más la necesidad de transmitir la información realmente relevante de una

manera clara, directa y de manera útil los que pueden realmente cambiar el modo de consumir energía y con ellos reducir la carga económica de la energía dentro de la familia.

En otra derivada, no menos importante, las instituciones, las entidades de vivienda y las comunidades de propietarios en general sean destinadas al alquiler o no, necesitan controlar y minimizar la problemática de la morosidad. Vivir en una comunidad de propietarios compartiendo suministros y recursos supone solidaridad y respecto que en muchos casos por una u otra derivada no se dan y que generan graves conflictos sociales.

Si enfocamos el tema al ámbito de la rehabilitación, la situación del mercado refleja de manera integral todo lo anteriormente citado. *¿Por qué una comunidad de propietarios opta por renovar en lugar rehabilitar energéticamente? ¿El propietario es consciente del ahorro económico real que puede llegar a tener? ¿Se puede medir el confort? ¿El ahorro energético es real?*

Frente a estas preguntas, muy de moda últimamente con el desarrollo de los procesos de rehabilitación, diferentes soluciones y tecnologías están o pueden cambiar la manera de afrontar estos procesos.

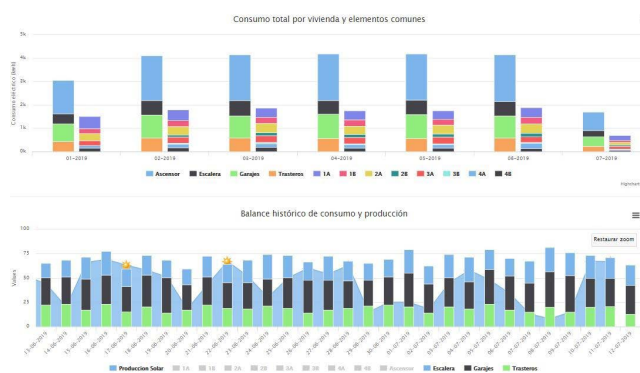
El desarrollo tecnológico y la incorporación de soluciones “Smart” pueden y deben cambiar el modelo de rehabilitación actual haciendo tangibles las bondades de una rehabilitación energética integral.

Está claro que la apuesta de la sociedad y las instituciones pasa por la renovación y rehabilitación del parque de viviendas existente, pero quedarse en un lavado de cara sería perder una importante oportunidad por mejorar el confort, la calidad de vida, la mejora medioambiental y por supuesto todas las posibilidades de desarrollo empresarial y tecnológico que podría suponer.

Poco a poco va calando en la sociedad y en los profesionales la necesidad de incorporar los mejores aislamientos, mejorar cerramientos, aplicar soluciones y técnicas constructivas que resuelvan los problemas de confort, habitabilidad, salubridad y un sinfín de aspectos visuales y arquitectónicos. Y del mismo modo, los fabricantes de soluciones y los especialistas en la colocación de dichas soluciones perfeccionan sus técnicas y aplicaciones.

Pero como intentábamos introducir al inicio de este artículo la pregunta y reto a resolver es: **¿qué percepción tiene el consumidor o propietario sobre el verdadero resultado que puede obtener tras un proceso de rehabilitación?**

Frente a esta pregunta, hoy podemos asegurar que la solución existe, es sencilla, fácil de implantar, flexible, adaptable, barata y que podría no solo ser útil para los propietarios de las viviendas sino que podría servir para evaluar los diferentes comportamientos de los edificios y de las soluciones ejecutadas. Hablamos de la tecnología “Smart”, de la monitorización, del uso inteligente de los datos y los comportamientos, de tangibilizar el coste del confort y de trasladar al usuario la responsabilidad de su factura energética.



Hablamos exactamente de monitorizar a tiempo real los contadores de gas o energía térmica en sistemas centralizados, los contadores de agua fría y caliente, los contadores eléctricos, sondas de temperatura y humedad en el interior de las viviendas, temperaturas exteriores, de cámaras, de garajes, los funcionamientos de los ventiladores o extractores, en definitiva, todo aquel dato que permita al usuario y al profesional conocer a tiempo real que está pasando con su edificio o vivienda. Hablamos además de utilizar un lenguaje directo y claro, hablar de dinero y costes.

Hoy en día monitorizar cualquier tipo de contador, sonda o equipo es realmente sencillo y barato, y trasladar esos datos al usuario o al gestor es cuestión de descargarse una App. El avance de las tecnologías de la comunicación e integración de datos está permitiendo adaptarse a cualquier tipología de edificio o proyecto ya sea con un simple cableado IP, con una red wifi o con

cualquier tecnología vía radio. Un pequeño conducto de PVC o una canaleta instalada durante el proceso de rehabilitación podría permitir a un usuario comparar los consumos y costes antes del proceso de rehabilitación con el consumo y coste posterior. Una red de sondas de temperatura y humedad conectadas a una red wifi comunitaria podrían proporcionar a todos los vecinos la información suficiente para evaluar su grado de confort e incluso gestionar de manera inteligente sus sistemas de calefacción.



Dentro de las posibles ventajas que genera el uso de las soluciones Smart esta la verificación del comportamiento de las energías renovables dentro de los edificios. Son muchos los propietarios que desconfían de las renovables porque desconocen lo que realmente aportan a su instalación. Un contador de producción energética con su conversión en euros, puesto a tiempo real en la mano de un propietario haciéndole visible el ahorro que está obteniendo frente a no usar las renovables es el mejor método para convencerle de la efectividad de las renovables.

Se puede definir el empoderamiento energético como la situación social en la que los consumidores, siendo plenamente conocedores del impacto económico, energético y medioambiental de su comportamiento adaptan sus hábitos energéticos para conseguir la máxima eficiencia. El objetivo del empoderamiento energético es conseguir el mayor confort posible al menor coste

y causando el menor impacto medioambiental.

Para posicionar al usuario frente a su nivel de empoderamiento y con ello establecer las acciones más adecuadas para mejorarlo se han definido tres situaciones o niveles:

- Nivel Bueno: Se entiende como nivel de empoderamiento “BUENO” cuando los indicadores de consumo, coste y comportamiento están por debajo de medida de los perfiles comparativos.
- Nivel Aceptable: Se entiende como nivel de empoderamiento “ACEPTABLE” cuando los indicadores de consumo, coste y comportamiento están +/- 5% sobre los niveles medios de los perfiles comparativos.
- Nivel Mejorable: Se entiende como nivel de empoderamiento “MEJORABLE” cuando los indicadores de consumo, coste y comportamiento están por encima de la medida de los perfiles comparativos en más de un 5%, las contrataciones energéticas están fuera de los parámetros más económicos del marco público o cuando el comportamiento global de la familia este muy alejado de un uso razonable de la energía.

Para la identificación y calificación de los niveles de empoderamiento energético se deben tener en cuenta diferentes aspectos de la economía familiar, de sus conocimientos, hábitos y tipología de vivienda analizando desde el número de ocupantes de una vivienda, sus edades o los periodos de ocupación de la vivienda pasando por diferentes aspectos constructivos, económicos y de cultura general vinculada con los aspectos energéticos.

### 3. En busca del kWh perdido.

La vigilancia del comportamiento energético como impulso a una gestión eficaz. Como venimos repitiendo, la energía y su coste tienen un importante impacto en la economía familiar y en la competitividad de las empresas. El coste energético y todo lo vinculado al confort y sus derivadas en la salud, son seguramente el principal problema de las familias.

Más de uno se habrá tirado de los pelos cuando haya visto sus facturas. La energía es un bien intangible, difícil de medir, controlar y vigilar. Y además hay que pensar que hay actividades empresariales que ga-

nan dinero con nuestro consumo, por lo que harán todo lo posible por vender todos los kWh que puedan.

Frente a esta situación y de manera prioritaria frente a cualquier otra acción, se convierte en fundamental la vigilancia del comportamiento energético, que traducido a una lengua coloquial significa, controlar de manera precisa el consumo y coste buscando siempre la máxima eficiencia y eficacia.

Cuando hablamos de vigilancia del comportamiento energético nos referimos a monitorizar los consumos, coste y confort de todos aquellos equipos, instalaciones, espacios o equipamientos que tengan una cierta relevancia en la factura energética de nuestra vivienda.

La tecnología nos proporciona infinidad de soluciones para medir, comparar y controlar cualquier tipo de elemento y los sistemas informativos de mercado, son capaces de generarnos documentos y escenarios gráficos de manera comprensible y accesible.

Es decir, existen las soluciones técnicas y tecnológicas a precios realmente económicos como para mantener vigilado el consumo, coste y confort de cualquier tipo de instalación.



*Pero, ¿qué debería monitorizar? ¿Por dónde debería empezar?*

Frente a estas sencillas cuestiones, nos gustaría trasladaros un planteamiento eficaz para vigilar el comportamiento de una instalación al uso y una estrategia que garantice la máxima eficacia y eficiencia de la instalación.

En primer lugar, hay que empezar por monitorizar los contadores generales de suministro independientemente de su tipología de la energética. (Gas Natural, electricidad, Gasóleo C, Biomasa) Todos los equipos se pueden monitorizar de manera paralela a la compañía distribuidora o a la comercializadora de turno. Con una monitorización de los contadores tendremos a tiempo real el consumo que se está produciendo de manera instantánea.

Si disponemos de una plataforma donde indexar el precio que nos cobra la compañía, podremos tener el coste minuto a minuto de nuestra instalación. Podremos saber lo que nos cuesta por las mañanas, por las tardes, por las noches, los fines de semana, etc. etc... Simplemente con instalar un pequeño dispositivo podremos generar indicadores y ratios para saber cuándo, por qué y cuánto supone tener nuestra instalación en marcha.

Estamos seguros que el responsable de la economía familiar agradecerá conocer con antelación la próxima factura energética.

A partir de una esta primera fase el abanico de vigilancia se abre notablemente. Lo habitual es seleccionar los servicios, equipos o equipamientos con un supuesto mayor consumo bien sea por su potencia o por su utilización. Hablamos de los sistemas de climatización, de calentamiento, de deshumectación, de alumbrado, de calentamiento... en su mayoría hablamos de sistemas eléctricos por que deberemos identificar los cuadros o líneas que los alimentan y monitorizar exclusivamente esos procesos.



Si hablamos del tema térmico, es posible que no existan contadores de energía para el sistema de calefacción/climatización, lo cual se convierte en una necesidad imperiosa si queremos identificar cuál de estos procesos se lleva más o menos porcentaje de la factura térmica.

Hoy en día existen multitud de equipos para medir la producción térmica de estos procesos y su instalación no es relativamente compleja. Conocer a tiempo real el funcionamiento de las calderas y su referencia a la ocupación podría ser fundamental para ver y optimizar las instalaciones.

Después de este segundo nivel se deberían monitorizar los equipamientos o estancias de mayor uso de la instalación. Hablamos de los cuadros eléctricos o líneas de producción, o espacios incluyendo el consumo eléctrico, térmico y mediante la instalación de sondas de temperatura y humedad el grado de confort existente o incluso unidades de producto.

*Pero, ¿qué hacemos con toda esta información?*

Una de las ventajas de la monitorización es el grado de información y datos que se obtienen, pero que sin una utilización clara pueden perderse en el fondo de cualquier ordenador.

La implantación de un sistema de vigilancia, supone la asignación de una responsabilidad en el seguimiento de dichos datos y en la gestión de los mismos. La generación continuada de datos de los diferentes niveles, cruzada con otros datos sobre el funcionamiento de la instalación como nivel de ocupación, temperaturas exteriores, eventos o actividades singulares o programadas debe permitir generar una línea base de comportamiento, consumo y coste que servirá de guía y de elemento de contraste para evaluar el grado de eficacia de las acciones que se lleven a cabo.

De manera paralela, la monitorización de los consumos de los contadores de compañía y de los contadores de producción nos permitirá controlar el rendimiento energético real de nuestros sistemas. ¿Cuánta energía compramos y cuanta energía conseguimos? ¿Que nos cuesta realmente conseguir la energía que necesitamos? ¿Cuándo es más barato conseguir la energía que necesitamos? ¿Cuándo nos cuesta más cara la energía que necesitamos?

La instalación de equipos de monitorización y vigi-

lancia nos puede permitir conocer el comportamiento real de nuestra instalación y sobre dicho comportamiento actuar en consecuencia y con sentido común.

Conocer a tiempo real el comportamiento y rendimiento de nuestra instalación y equipamientos nos permitirá controlar y minimizar el impacto de la energía en la cuenta de explotación de la instalación permitiendo optimizar los recursos en aquellas parcelas donde realmente sean necesarios. La energía es algo intangible que actualmente solo se percibe en la factura que nos manda cada compañía. Con la monitorización de equipos y con las herramientas adecuadas podremos mantener controlados esos kW que ahora no vemos. Hacer visible la energía pasa por la monitorización.

## 4. Adquisición de la información

Anteriormente hemos citado la importancia de adquirir los datos de manera eficaz para su posterior utilización, pero es fundamental elegir equipos y tecnologías robustas para crear “autopistas” de información fiable y segura.



Actualmente existen muchas posibilidades técnicas para instalar soluciones de monitorización y sistemas de adquisición de datos. Podríamos hablar inicialmente de dos soluciones, las que sean cableadas y las que sean inalámbricas.

Lógicamente en las instalaciones ya construidas y dentro de viviendas o empresas es más fácil implantar

soluciones inalámbricas que cableadas. Las soluciones cableadas ofrecen mayor seguridad en la adquisición de los datos, pero en muchas ocasiones la realización de obras impide su utilización. Cuando hablamos de sistemas cableados, podríamos centrarlos en la tecnología Mbus, KNX, modbus principalmente y cuando hablamos de soluciones inalámbricas serían soluciones Wireless Mbus, Lora, Sigfox o ARN IoT.

El avance de las tecnologías IoT está revolucionando el mundo de la comunicación y de la gestión de datos y veremos en los próximos años grandes avances en dispositivos, sistemas de comunicación, almacenamiento y transmisión de datos que facilitarán el proceso de digitalización del consumo, coste y confort.

## 5. Conclusiones

Como conclusión nos gustaría exponer tres situaciones y retos que afectan muy directamente a todos los agentes vinculados al sector y al propio crecimiento del mismo.

El primero de ellos hace referencia a la importancia de trabajar coordinadamente y de establecer protocolos de trabajo, conectividad y utilidad. Es necesario crear metodologías, normativas o recomendaciones que obliguen y especifiquen detalladamente ¿qué?, ¿cómo? y ¿para qué? se debe medir y monitorizar. Es fundamental que en todas las CCAA, colegios profesionales, centros tecnológicos o de referencia se aborden de la misma manera las necesidades de monitorización tanto en tecnologías, en parámetros y en la propia utilidad del dato.

Una vez definidas las necesidades y las utilidades de la monitorización no debería ser tan complicado difundir, recomendar y “obligar” a la instalación y posterior gestión de los datos en el beneficio directo de la reducción de la demanda energética, de la mejora del confort y de la consiguiente reducción de la factura energética de las familias.

Otro gran reto es la gestión de la información, cientos de valores, parámetros, equipos, etc., grandes volúmenes de información que desconexa entre sí no sirve de nada. Contar con una gran base de datos pública y eficaz serviría para generar multitudes de perfiles, estadísticas, comparativas, ratios e indicadores que servirían de base para cualquier tipo de proyecto de rehabilitación,

construcción o sensibilización. Actualmente no existe ningún protocolo de gestión de la información y cada entidad u organismo hace lo que estima más oportuno sin tener en cuenta factores relevantes para encuadrar los datos más allá de un frío valor. Donde quedan los datos de la unidad familiar, de la percepción del confort, de los niveles de conocimiento y sensibilización.

Y por último y como gran reto, la comunicación y el uso de la información como principal elemento de sensibilización y cambio de mentalidad sobre el modelo energético. Está comprobado que conocer el consumo, coste o comportamiento energético a tiempo real puede reducir la factura energética en más de un 10%. Conocer en tiempo real las situaciones de “pobreza energética” o discomfort evitaría futuras actuaciones públicas de mayor envergadura.

Es fundamental que las familias y los consumidores interioricen la importancia de conocer su consumo. En otros sectores, el “dato” se ha convertido en algo indispensable, a nadie se le ocurriría o ni si quiera podría comprar un vehículo sin cientos o miles de sensores que le dan información, le ayudan a la conducción o le protegen. Y en la edificación, Alguien se ha parado a pensar cuantos sensores se instalan de serie? Si, ninguno. Hasta los llamados “contadores inteligentes” solo son útiles para las compañías y no para el usuario.

En una situación como la actual donde el coste y la dependencia de las energías convencionales, así como la importancia actual de la calidad del aire hace fundamental la incorporación de herramientas tecnológicas, es de mayor importancia canalizar la información hacia quien la genera en primera instancia, es decir los consumidores, las familias y hacerlo en un sentido claro, sencillo y entendible.

Las familias y los consumidores necesitan referencias, guías o patrones sobre los que referenciarse para adecuar su comportamiento.

En resumen y partiendo de una gran base actual, solo necesitamos buenos sistemas tecnológicos, sistemas robustos y coordinados de almacenamiento, protocolos claros y normativas efectivas, difusión y sensibilización en todos los niveles y ámbitos y coordinación entre todos los agentes. Transformar el modelo energético pasa por la correcta utilización de la información.

# Encuesta Redes de Monitorización

RED MONITOR

Grupo de Trabajo 1 - Información

## Encuesta Redes de Monitorización

### RESUMEN

En este artículo se presentan los resultados obtenidos en la encuesta “Redes de Monitorización” realizada por el Grupo de Trabajo 1 – Información de la Red Monitor. La idea de la encuesta surge en la Mesa Redonda de este grupo de trabajo durante la primera Jornada de la Red Monitor, el 31 de mayo de 2018. El objetivo de la encuesta fue recopilar información de todos los grupos de la red sobre qué sistemas de monitorización utilizan, el software, el método de procesamiento de la información, con qué finalidad, la estructura de almacenamiento de datos, disponibilidad de los mismos, etc. Han participado 15 grupos de investigación y los resultados obtenidos muestran los puntos en común entre los diferentes grupos y pretende servir como un punto de partida para unificar criterios, así como para establecer un marco de colaboración entre los grupos..

**Palabras clave:** Encuesta, monitorización, adquisición de la información, procesamiento de la información

## Monitoring Networks survey

### ABSTRACT

*This article presents the results obtained in the “Monitoring Networks” survey carried out by Working Group 1 - Information from the Monitor Network. The idea of the survey arises in the Round Table of this working group during the first meeting of the Network Monitor, on May 31, 2018. The objective of the survey was to collect information from all the groups in the network about which monitoring systems usually use, the software, the processing data method, for what purpose, the structure of data storage, data availability, etc. Fifteen research groups have participated and the results obtained show the points in common between the different groups and it aims to serve as a starting point to unify criteria, as well as to establish a framework for a possible collaboration between groups.*

**Keywords:** survey, monitoring, information acquisition, information processing



## 1. Introducción

La Red de Excelencia “*Monitorización y evaluación de la habitabilidad, calidad del aire y eficiencia energética de los edificios*”, cuyo acrónimo **Red Monitor** es cómo más se conoce; se planteó como objetivo principal construir un marco de trabajo para integrar a los grupos de investigación activos en la monitorización de edificios y componentes. La consecución de este objetivo debe permitir extraer las bases comunes para el desarrollo de los protocolos de ensayo y evaluación en condiciones exteriores reales en los diferentes climas de la península, tanto en edificios existentes como en condiciones controladas en celdas de ensayo.

La Red se estructuró en cuatro *Grupos de Trabajo (GT): Información, Módulos, Edificación y Barrios*. El objetivo que se planteó el Grupo de Trabajo 1 (GT1) Información fue recabar, poner en común e intentar unificar criterios acerca de cómo, cuándo y cómo procesar la información, con el objetivo de brindar soluciones adecuadas a la rehabilitación, mejora de la habitabilidad y de la eficiencia energética de los edificios.

Durante la Mesa Redonda del GT1 en la primera Jornada de la Red, los grupos presentes comentan la problemática existente debida a la desconexión de la investigación y la transferencia tecnológica en este campo, que viene determinada entre otros motivos por el uso de las empresas de programas y sistemas cerrados que no permiten incorporar los resultados obtenidos en investigación. Además, se plantea que un reto fundamental de la monitorización en la edificación es dimensionar correctamente el sistema. Existen pocas pautas establecidas, y sigue siendo objeto de investigación, conocer el número y tipo de sensores necesarios y cómo distribuirlos dependiendo de la aplicación y del objetivo que se quiere conseguir. Con el objetivo de contribuir para aportar soluciones a esta problemática se planteó la realización de una encuesta entre los participantes de la Red. La encuesta ha sido cumplimentada por 15 de los grupos participantes e invitados de la Red y los resultados muestran los puntos comunes, así como la multidisciplinaridad de los grupos.

## 2. Diseño de la encuesta redes de monitorización

El objetivo de la encuesta es recopilar información relativa a los sistemas de monitorización que se utilizan, el software, cómo procesan los datos y con qué finalidad, la estructura de almacenamiento y disponibilidad de los mismos.

La encuesta se implementó en la plataforma de encuestas online: [onlineencuesta.com](http://onlineencuesta.com). Dicha encuesta se estructuró en seis grupos: variables a monitorizar, usuarios, condiciones temporales, sistemas de monitorización y software; y en general los apartados permitían respuestas múltiples.

### 2.1. Variables a monitorizar

Respecto a las variables a monitorizar se establecieron diferentes subgrupos: variables outdoor (Temperatura, humedad, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, radón, calidad del aire, luminosidad, partículas, entre otras), variables indoor (Temperatura, humedad, calidad del aire, ventilación u otros) propiedades energéticas (consumo energético, de agua o eléctrico, conductividad térmica, flujo térmico u otros), propiedades del material (transmitancia, densidad, emisividad u otro) y acústicas (ruido aéreo e impacto u otras).

### 2.2. Usuarios

El grupo usuarios tenía como finalidad identificar los tipos de ambientes a monitorizar: doméstico, laboral, personas, vehículos, animales o sistemas automáticos.

### 2.3. Condiciones temporales

Las condiciones temporales permitían identificar los períodos de muestreo en la toma de datos.

### 2.4. Sistemas de monitorización

En el apartado sistemas de monitorización se tuvieron en cuenta el número de sensores utilizados, los sistemas, valorando si son diseño propio o comercial, el tipo de red de comunicación (IoT, WSN, Wifi, Ethernet, entre otras) y de alimentación (red eléctrica, baterías, energías alternativas como solar, eólica, térmica).

## 2.5. Software

En lo referente a software de adquisición se tuvo en cuenta si este era de diseño propio, en cuyo caso se han identificado los entornos más utilizados para su desarrollo (C++, Python, Matlab, Labview u otros); o si estos eran comerciales. También se identificó la forma de almacenamiento de los datos (nube, local) y cómo se otorgaba el acceso a los datos de la monitorización (público, compartido, local, entre otros).

## 3. Resultados de la encuesta redes de monitorización

Como ya se ha dicho anteriormente, la encuesta ha sido completada por 15 grupos de la red, aunque no en todas las preguntas fueron contestadas por todos.

### 3.1. Resultados de las variables a monitorizar

Este grupo constaba de 5 apartados. El primer apartado: Propiedades a monitorizar en ambientes outdoor, fue contestado por 14 participantes con los resultados mostrados en la Figura 1. El análisis de los resultados indica que las variables más medidas son la temperatura y la humedad seguidas de la radiación solar y el CO<sub>2</sub>. Otras variables que han sido monitorizadas son la velocidad y dirección del viento; la lluvia, distancia y ozono.

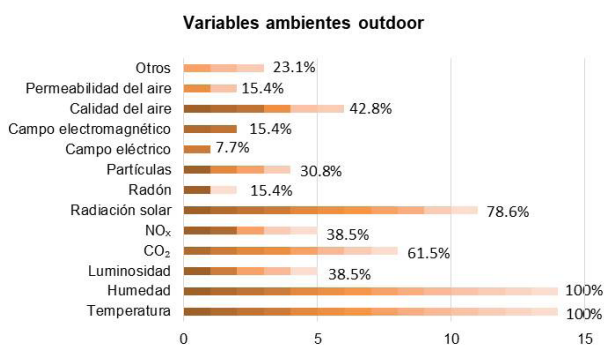


Figura 1. Resultados variables outdoor.

En el segundo apartado: Propiedades a monitorizar en ambientes indoor fue contestado por 15 participantes y los resultados se muestran en la Figura 2. Las propiedades indoor más medidas son la temperatura,

la humedad y la calidad del aire. Entre los otros parámetros indoor que se miden están la permeabilidad del aire, la temperatura superficial, flujo de calor superficial, CO<sub>2</sub>, luminosidad, presencia, TVOC, partículas, presión atmosférica, formaldehído, carpintería abierta, consumo eléctrico, consumo de agua, consumo de gas, flujo térmico a través de cerramientos, caudales de agua y aire en circuitos de acondicionamiento.

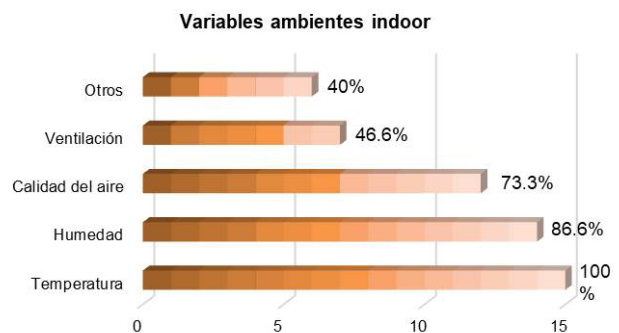


Figura 2. Resultados variables indoor.

En el tercer apartado: Seleccione propiedades energéticas a monitorizar, se contabilizaron respuestas de 13 grupos, Figura 3. Las propiedades más frecuentemente medidas son el consumo eléctrico, térmico y de agua. Otras propiedades medidas son: la producción de energía, medidas de voltaje, corriente, frecuencia, potencia (activa, reactiva, aparente, factor de potencia), energías y picos de voltaje y corriente, transmitancia térmica, coeficiente global de pérdidas o ganancia solar.

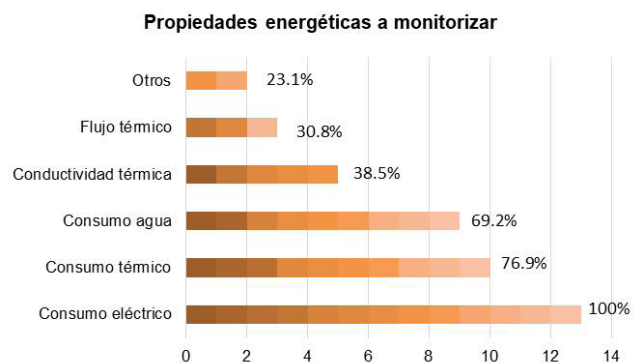


Figura 3. Propiedades energéticas a monitorizar.

En cuanto a las propiedades del material a monitorizar, 11 de los grupos participantes han contestado este apartado, Figura 4. La transmitancia térmica es la propiedad que miden todos los grupos mientras que la emisividad y densidad es medida solo por una tercera parte de los grupos.

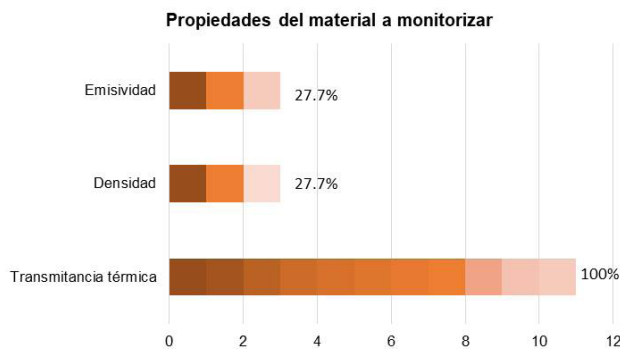


Figura 4. Propiedades del material a monitorizar.

Las propiedades acústicas son las propiedades menos monitorizadas en general, véase Figura 5. Sólo 4 grupos las miden. La propiedad más medida es el ruido aéreo e impacto, y entre las otras propiedades se encuentran el tiempo de reverberación o la inteligibilidad.

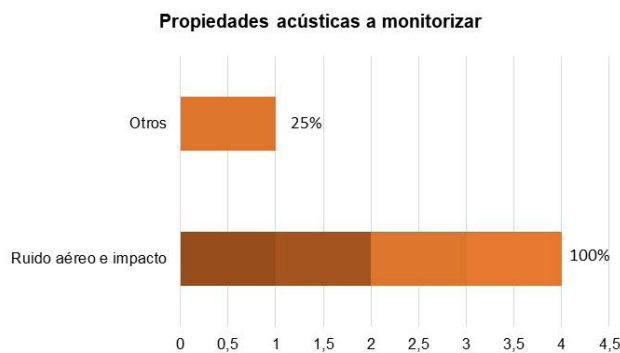


Figura 5. Resultados propiedades acústicas.

### 3.2. Resultados de usuarios

El grupo Usuarios tenía como objetivo identificar los ambientes monitorizados, Figura 6. De los 16 grupos que respondieron este apartado, el 100% monitoriza ambientes domésticos, el 68.7% laboral, el 25% personas y el 12.5% sistemas automáticos.

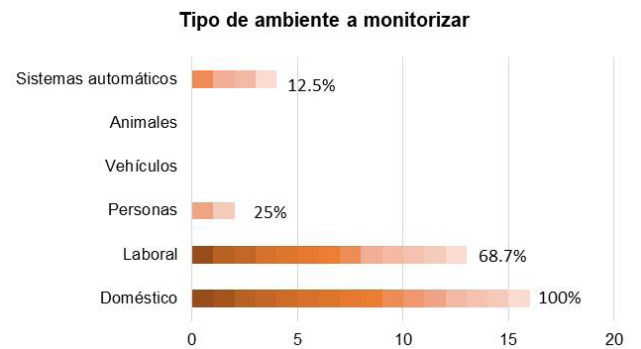


Figura 6. Resultados ambientes monitorizados.

### 3.3. Resultados condiciones temporales

El grupo Condiciones Temporales pretendía identificar los períodos de muestreo utilizados más frecuentemente, Figura 7. Este apartado fue contestado por 14 grupos, el 64.2% utiliza minutos, seguido de segundos (21.4%) y horas (14.2%). Un tercio de los participantes utilizan otros períodos como 12 meses o más, semana invierno y semana verano.

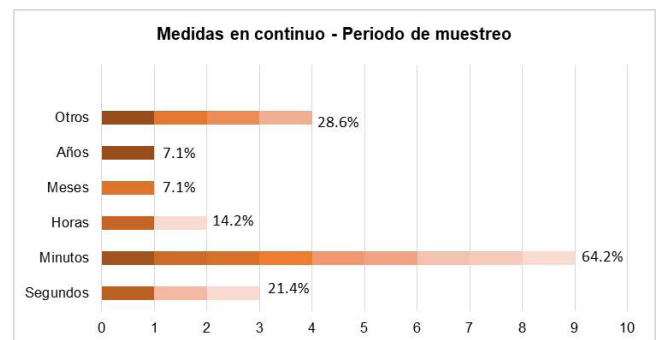


Figura 7. Periodo de muestreo.

### 3.4. Sistemas de monitorización

El grupo Sistemas de Monitorización estaba compuesto por 5 apartados. El primer apartado pretendía identificar el número de sensores utilizados normalmente en las monitorizaciones realizadas y fue contestado por 15 grupos. En el 40% de los casos se utilizan entre 5 y 10, el 33% entre 1 y 5, mientras que un 26% han utilizado entre 100 y 200 sensores, Figura 8.

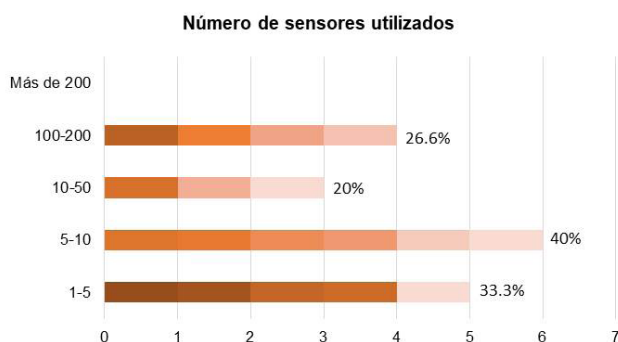


Figura 8. Número de sensores utilizados.

El segundo apartado estaba relacionado con el tipo de sistemas utilizados, propios o comerciales y fue contestado por 14 grupos, de los cuales 5 utilizan sistemas de diseño propio y 11 sistemas comerciales. En la Figura 9 se muestran los sistemas utilizados por los diferentes grupos.

Diseño propio: Breve descripción y enlace	Comerciales: Modelo, enlace a la descripción y empresa suministradora
	Varios- Empresa Vigilancia energética
	airsense, <a href="https://cliensol.es/collections/sensores-calidad-aire">https://cliensol.es/collections/sensores-calidad-aire</a> , <a href="http://www.stechehome.es">www.stechehome.es</a>
Diseño propietario desarrollando electrónico y sistemas operativos en tiempo real	
	<a href="http://www.riegl.com/uploads/tx_pxriegl/downloads/10_DataSheet_VZ-400_2017-06-14.pdf">http://www.riegl.com/uploads/tx_pxriegl/downloads/10_DataSheet_VZ-400_2017-06-14.pdf</a> , <a href="https://www.flir.com/products/a65/">https://www.flir.com/products/a65/</a>
Sistemas desarrollados por nuestro departamento electrónica a partir de diversos componentes y equipos de diferentes marcas. <a href="http://www.iter.es">www.iter.es</a>	
"ARFRISOL Buildings-UIE3-CIEMAT". Chapter of	
	smart IoT labs ( <a href="https://www.smartiotlabs.com/es/nuestra-tecnologia/">https://www.smartiotlabs.com/es/nuestra-tecnologia/</a> )
	STEP TCS-01, <a href="http://stepsl.com/index.php">http://stepsl.com/index.php</a> , Step Logística y Control, S.L.
	Kit LORA, RAY-IE, <a href="https://tienda.ray-ie.com/44-lora">https://tienda.ray-ie.com/44-lora</a>
	AWAIR, cliensol energy
	Varios: MadgeTech ( <a href="mailto:info@sumelco.com">info@sumelco.com</a> ), Alhorn ( <a href="mailto:safer@saferinstrument.com">safer@saferinstrument.com</a> ), Sensonet ( <a href="mailto:daniel@sensonet.com">daniel@sensonet.com</a> )
EcoWin de Temperatura y humedad Carpintería abierta, wifi, con Batería recargable de litio 18650. EcoCounter, Contador de impulsos mediante Arduino Yun, wifi.	RAY STH, Temperatura y humedad. RAY STC, Temperatura, humedad y CO2 ( <a href="http://www.ray-ie.com/">http://www.ray-ie.com/</a> ). Circutor CVM-B150, Analizador de red trifásico de panel con transformadores de intensidad y Circutor Wibeec, de consumo eléctrico ( <a href="http://wibeec.circutor.com">http://wibeec.circutor.com</a> )
	Compact Fieldpoint de National Instrument con SCADA propio. Pag 97 y 171 en <a href="http://www.iea-ebc.org/Data/publications/EBC_Annex_58_Final_Report_ST1a.pdf">http://www.iea-ebc.org/Data/publications/EBC_Annex_58_Final_Report_ST1a.pdf</a>
WillTemp: sistema inalámbrico para la medida de la temperatura y la humedad. Sistema medida Radón	

Figura 9. Sistemas de monitorización utilizados.

En el tercer apartado se recogió la información relacionada con los métodos de transmisión de tipo red utilizados, y fue contestado por 14 grupos, Figura 10. El más usado es Ethernet seguida de protocolos de IoT y redes inalámbricas de sensores (WSNs).

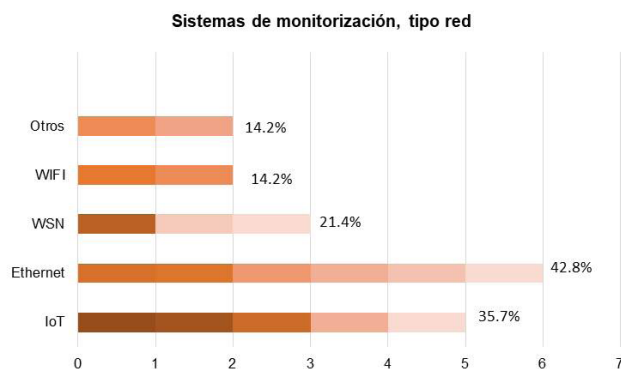


Figura 10. Métodos de transmisión.

El cuarto apartado recoge la información relacionada con el tipo de transmisión centralizada utilizada. Esta pregunta fue contestada por 10 grupos, 8 de los cuales utilizan transmisión multicanal, 1 grupo usa transmisión monocal y un grupo ha utilizado ambos.

El apartado quinto recogió la información relacionada con la alimentación de los sistemas, Figura 11. La mayoría usa red eléctrica o baterías.

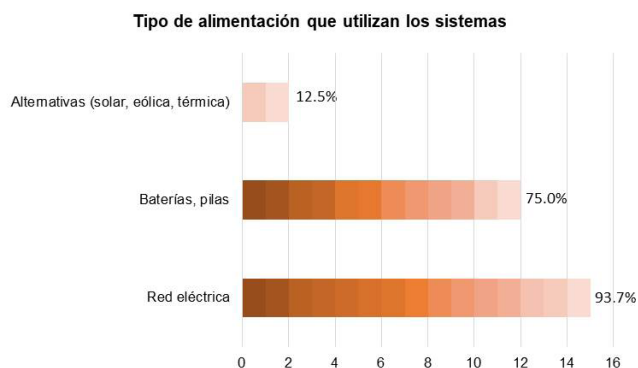


Figura 11. Resultados sistemas de alimentación.

### 3.5. Software

El grupo Software estaba dividido en 5 apartados. El primer apartado recogió la información relativa al software de adquisición y fue contestada por 16 grupos. Por una parte, se identificaron cuantos grupos utilizan software de diseño propio y comercial, 7 y 9, respectivamente. De los grupos que utilizan software de diseño propio se identificaron qué programas utilizan para implementar la adquisición de datos, Figura 12. Una tercera parte de los grupos emplean de programas como R, desarrollos propios del departamento ingeniería ITER o HTML + WinSCP 5.17.

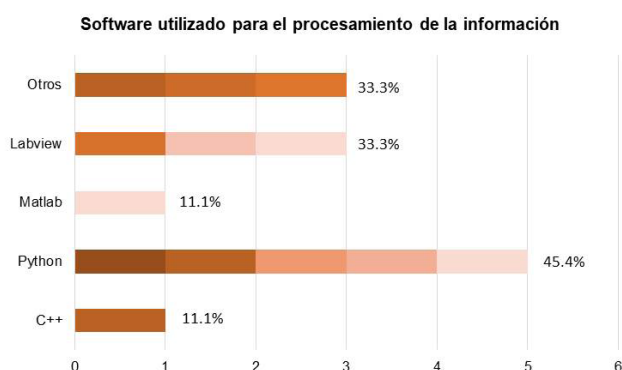


Figura 12. Resultados software de adquisición.

Respecto al uso de software comercial, 5 de los grupos participantes exponen qué plataforma utilizan, la cual, en general, está asociada a los sistemas de medida, Figura 13.

16. Si utilizas software comercial para la adquisición, indique cuál, así como una breve descripción.
Se están monitorizando calidad del aire y consumos energéticos. La instalación la realiza la empresa Stechome ( <a href="http://www.stechome.es">www.stechome.es</a> ). Los datos los recibe Stechome, nos los envía al CSIC (FTP) y los descargo en local con wildfire para trabajar con ellos.
base de datos del fabricante, descarga en Excel
Software TCS-01 y sistema de adquisición de datos en riel DIN DL-01-CPU de la empresa STEP Logística y Control.
El KIT está configurado de fábrica para empezarlo a usar con la plataforma EmonCMS de adquisición y gestión de datos, pero puede ser reprogramado para usar cualquiera que permita envíos por su API, por ejemplo, GRAFANA.
Energy control plus. ClienSol

Figura 13. Resultados software de adquisición comercial.

En el apartado forma de almacenamiento de los datos, Figura 14, participaron 15 grupos. La mayor parte de los grupos almacena los datos localmente, el 53% utiliza la nube y un 20% utiliza servidores propios, nube en instalaciones propias o almacenamiento local con copia de seguridad en servidores propios.

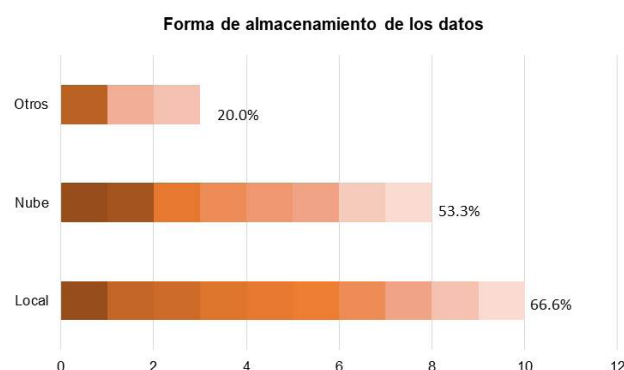


Figura 14. Resultados forma de almacenamiento de los datos.

El apartado relacionado con el acceso que se otorga a los datos fue contestado por 15 grupos, de los cuales el 66.6% hace un uso personal, el 20% compartido y un 12.5% hace los datos públicos, Figura 15. Un 12.5% de los grupos ha implementado formas de acceso como: al sujeto y a los investigadores; configurable, se puede elegir qué datos son privados y cuáles públicos; API de descarga con control de acceso o acceso restringido a los miembros del grupo de investigación y grupos colaboradores.

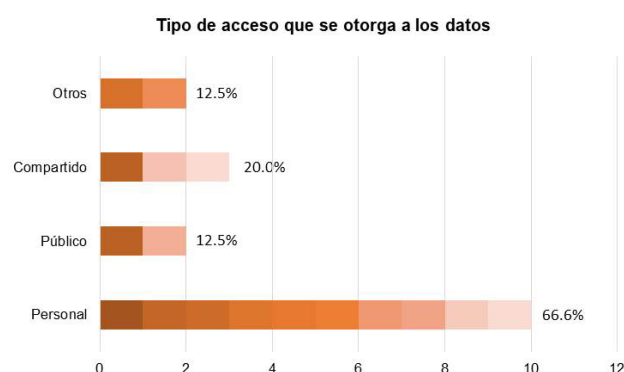


Figura 15. Resultados acceso que se otorga a los datos.

El apartado relacionado con el formato utilizado para guardar los datos fue contestado por 15 grupos, Figura 16. El 80% de los grupos guarda los datos en formato texto mientras que un 40% utiliza otro tipo de formato como: MySQL, el software del fabricante de los sensores, csv, mat, xlsx, JSON y la base de datos InfluxDB.

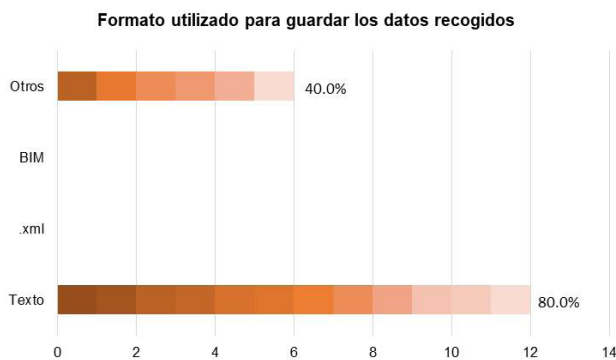


Figura 16. Resultados formato utilizado para guardar los datos.

El apartado relacionado con el software utilizado para procesar los datos fue contestado por 16 grupos. El software más utilizado para el procesamiento de los datos es Excel (75%), seguido por Matlab (37.5%), FME y Labview (6.25%). Otros softwares utilizados son: Python, R, Stata, EmonCMS o programas asociados a la aplicación utilizada.

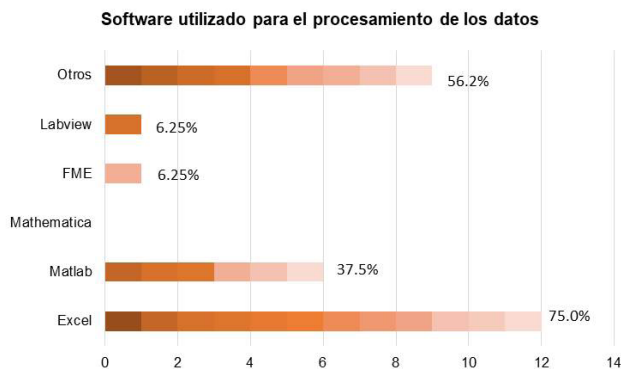


Figura 17. Resultados software utilizado para procesamiento de los datos.

## 4. Conclusiones

Los resultados de la encuesta muestran los puntos en común que tenemos los grupos en relación a las redes de monitorización.

- Entre las propiedades más monitorizadas por todos los grupos o la gran mayoría se encuentran la temperatura y humedad, outdoor e indoor, el consumo eléctrico, la transmitancia térmica.
- El ambiente más monitorizado es el doméstico y el período de muestreo más empleado son los minutos con una mayoría de sistemas comerciales.
- Respecto al software de adquisición de datos, se emplean tanto sistemas comerciales como de desarrollo propio, aunque estos últimos un poco más. La multidisciplinaridad de los grupos les permite implementar sistemas propios con los que tienen un mayor control de todos los parámetros de adquisición.
- Los datos recogidos, generalmente, son almacenados localmente o en la nube, aunque el acceso que se otorga a estos es principalmente personal, se guardan en formato texto y se procesan principalmente en Excel o Matlab.

Esta encuesta refleja una "foto" de lo que estamos haciendo los diferentes grupos respecto a las redes de monitorización. Para los grupos y usuarios, en general, puede ser una herramienta que ayude a definir y dimensionar los sistemas de monitorización, así como el procesamiento de la información. El desarrollo de sistemas propios puede permitir un mayor control de los datos, el avanzar hacia una información compartida (en la medida de las posibilidades) y establecer procesamientos de los datos similares puede ayudar a establecer protocolos comunes.

## Agradecimientos

Los integrantes de la Red MONITORIZACIÓN Y EVALUACIÓN DE LA HABITABILIDAD, CALIDAD DEL AIRE Y EFICIENCIA ENERGÉTICA DE LOS EDIFICIOS desean agradecer al Ministerio de Economía y Competitividad de España la concesión del proyecto BIA2017-90912-RED de la Convocatoria Acciones de Dinamización Redes de Excelencia.





# GT2

Recintos / Celdas / Módulos

## Grupos de investigación

---

UNIDAD DE I+D SOBRE EFICIENCIA ENERGÉTICA  
EN LA EDIFICACIÓN (UiE3)  
CIEMAT

Laboratorio de ensayos Energéticos para Componentes de la Edificación (LECE) de la Unidad de I+D UiE3 del CIEMAT. Tipos de recintos, metodologías y casos de estudio

SCHE-IETCC  
CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES  
CIENTÍFICAS (CSIC)

Módulos experimentales en proyectos de investigación del Grupo SCHE-IETcc-CSIC. Proyectos REFAVIV, REVEN, RADON Pilot y Muro Trombe Termocrómico

SEMB  
UNIVERSIDAD DE LLEIDA

Análisis térmico de un edificio Earthbag en clima continental Mediterráneo. Monitorización y simulación

TEP 130  
UNIVERSIDAD DE SEVILLA (US)

Celdas de ensayo como herramienta de rehabilitación energética de fachadas. La experiencia en Andalucía

## Grupos invitados

---

INTROMAC

Ensayos experimentales de estrategias de mejora de la eficiencia energética en los demostradores EDEA CICE

CBBC-UTFPR  
Universidad Tecnológica Federal de Paraná (Brasil)

Desarrollo de una instalación de bajo costo para la investigación de confort interior

## Ponencia invitada

---

IETCC  
CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES  
CIENTÍFICAS (CSIC)

Conversión fotovoltaica para aire acondicionado en Madrid

# GT2

## Recintos / Celdas / Módulos

Coordinación

UNIDAD DE I+D SOBRE EFICIENCIA ENERGÉTICA  
EN LA EDIFICACIÓN (UiE3). CIEMAT

María José Jiménez Taboada.

mjose.jimenez@psa.es

### **Ensayos de soluciones constructivas a escala real y condiciones de intemperie**

Esta sección está dedicada a los trabajos realizados por los participantes en el Grupo de trabajo 2 de la Red Monitor, que incorporan el uso de recintos, celdas o módulos. Debe tenerse en cuenta que bajo la clasificación de recintos, celdas o módulos se incluye una gran diversidad de instalaciones experimentales. Se distinguen además múltiples aplicaciones y metodologías de evaluación y análisis de datos. Todas ellas tienen el objetivo común de estudiar y cuantificar de manera fiable el desempeño energético de componentes constructivos y elementos de envolvente bajo condiciones climáticas realistas. Estas construcciones normalmente permiten incorporar sistemas constructivos de tamaño real y la sustitución de estos sistemas con relativa facilidad, permitiendo desarrollar campañas experimentales de soluciones constructivas muy diversas. Disponen de alto nivel de control del ambiente interior y de instrumentación del mismo, lo cual habitualmente no es viable en edificios habitados por ser altamente intrusivo y caro. En este capítulo se incluyen siete ponencias que describen trabajos realizados en este tipo de instalaciones experimentales.

El trabajo presentado por la Unidad de I+D sobre Eficiencia Energética en la Edificación (UiE3) del CIEMAT describe las instalaciones del Laboratorio de ensayos Energéticos para Componentes de la Edificación (LECE) en la Plataforma Solar de Almería (PSA), la capacidad experimental de este Laboratorio, las metodologías de análisis de datos experimentales, y el contexto en el que esta infraestructura ha sido desarrolla-

da y utilizada. Este laboratorio dispone de dispositivos que permiten llevar a cabo campañas experimentales a diferentes escalas: Componentes y sistemas constructivos en recintos de ensayo, y edificios tanto vacíos como en condiciones reales de uso. Estas instalaciones permiten realizar diferentes estudios tales como la caracterización de envolventes constructivas mediante parámetros intrínsecos, calibración y validación de modelos de simulación, ensayos comparativos, o análisis de tendencias. La infraestructura del Laboratorio se ha desarrollado y utilizado en el marco de trabajo de sucesivos proyectos financiados por la Unión Europea, el Ministerio de Ciencia e Innovación, Comunidades Autónomas, etc.

La ponencia presentada por el Grupo SCHE-IETcc-C-SIC describe actividades realizadas en tres instalaciones experimentales diferentes. Estas instalaciones pertenecen al CSIC y a la UPM. Dos de estas instalaciones consisten en recintos de ensayo con alto aislamiento térmico, que permite instalar el componente a ensayar en su fachada sur sustituyendo al componente original del recinto. La otra instalación es un pequeño edificio. Los ensayos realizados en los recintos se han centrado principalmente en sistemas considerados para la rehabilitación energética de edificios construidos antes de la entrada en vigor del Código Técnico de la Edificación (CTE). Concretamente se han llevado a cabo ensayos de diferentes tipos de cerramientos opacos, ventanas y muro Trombe, y se han realizado análisis comparativos de estos sistemas respecto a sistemas convencionales típicamente utilizados en los edificios objeto del estudio. Por otra parte, el edificio que se describe se ha utilizado para llevar a cabo análisis comparativos para evaluar

la efectividad de diferentes estrategias que se pueden emplear para reducir la concentración de radón en edificios. Las actividades descritas se han desarrollado en el marco de varios Proyectos del Plan Estatal de I+D+i.

El Grupo TEP130 de la Universidad de Sevilla describe dos módulos construidos en el marco de trabajo de un proyecto de investigación financiado por una iniciativa de financiación Andaluza, y la investigación iniciada en este proyecto que continuó haciendo uso de la misma infraestructura en un proyecto del Plan Estatal de I+D+i. La infraestructura experimental consiste en dos módulos idénticos, cada uno de ellos con dos celdas de ensayo con orientación norte y sur, con alto aislamiento térmico y la posibilidad de instalar el componente a ensayar en las fachadas sur y norte respectivamente. Estos recintos se han utilizado para evaluar el comportamiento de diferentes soluciones de rehabilitación energética de fachadas, respecto a fachadas típicas de la vivienda social de Andalucía construida entre 1950-1980 antes de la entrada en vigor de la normativa referente a requisitos de aislamiento. Se han llevado a cabo ensayos comparativos centrados en las condiciones de confort interior. Además, las campañas experimentales desarrolladas se han aplicado para la validación de modelos de simulación y para el desarrollo de modelos numéricos. Todo ello se ha abordado con el objetivo de optimizar estrategias de rehabilitación energética de edificios, principalmente centrándose en la mejora de la envolvente en vivienda social.

El Grupo “Sustainable Energy, Machinery and Buildings (SEMB)” de la Universidad de Lleida presenta el estudio de una construcción denominada “Earthbag” que con-

siste en un recinto en forma de domo, construido mediante sacos de arena, que presenta mejor resistencia estructural que las construcciones tradicionales de adobe. El trabajo considera un año de datos experimentales y se analizan los niveles de confort alcanzados para invierno y verano, el comportamiento de dos estrategias de ventilación cruzada, y la demanda energética para periodos en los que las temperaturas interiores habrían estado por debajo de las de confort en caso de no calefactar el recinto. También se compararon los resultados obtenidos mediante simulación con las medidas experimentales. El trabajo realizado fue financiado por la Universidad de Lleida a través de su “Oficina de Desenvolupament i Cooperació” y por la Generalitat de Catalunya.

El trabajo presentado por la Universidad Tecnológica Federal de Paraná, describe dos recintos idénticos construidos en Curitiba, Brasil. Se trata de recintos cuyo diseño es de tipo oficina. Esta infraestructura se ha construido con el objetivo de dar soporte a trabajos de investigación y actividades docentes sobre confort térmico, acústico e iluminación en edificios. Los recintos se han diseñado e implementado con el objetivo de que sean de bajo coste, con el fin de que sean replicables, asequibles, y de utilidad en países en desarrollo. El trabajo que se describe se llevó a cabo en el marco de un proyecto financiado por el Consejo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico de Brasil y con la colaboración de varias empresas del sector privado.

INTROMAC describe una infraestructura que consiste en dos edificios idénticos cuya construcción corresponde a la típica vivienda de protección oficial en Extremadura. En los ensayos que se realizan, uno de estos

edificios se considera patrón y se mantiene en su configuración original. El otro se considera experimental y en él se implementan las modificaciones correspondientes a las soluciones constructivas a evaluar. Se llevan a cabo evaluaciones de soluciones constructivas a través de la comparación entre el comportamiento de las dos viviendas. Las comparaciones se refieren a la temperatura de aire interior cuando los ensayos se realizan en evolución libre, o al consumo energético empleado en el acondicionamiento cuando para los ensayos se establece una determinada consigna para la temperatura del aire interior. Esta infraestructura se ha desarrollado y utilizado en el marco de proyectos financiados por la Unión Europea en la convocatoria LIFE. A modo de ejemplo se describen las evaluaciones de algunas estrategias de acondicionamiento que se han realizado en esta infraestructura: mejora de aislamiento en la fachada norte, uso de persianas, ventilación natural, y chimenea solar.

Se incluye una ponencia adicional, presentada por el Grupo SCHE-IETcc-CSIC, que describe un estudio que utiliza como base un pequeño edificio de oficinas. El estudio se centra en el análisis de un sistema de refrigeración acoplado a un sistema fotovoltaico, que produce la electricidad consumida por el sistema de refrigeración de este edificio. Se analiza la producción fotovoltaica, la demanda del sistema de refrigeración, así como la reducción de gases de efecto invernadero que se consigue mediante este sistema. El trabajo que se describe se desarrolló en el marco de un proyecto financiado por el Plan Estatal de I+D+i.

En resumen, en los trabajos presentados se distinguen los siguientes tipos de instalaciones: (1) Recintos y edi-

ficios experimentales, vacíos, de geometría y construcción simplificada, y cuya construcción suele estar definida de una forma más precisa que los edificios reales. Todo ello facilita el análisis y reduce las incertidumbres. Están diseñados para estudiar el uso de energía y la calidad ambiental en relación a diferentes soluciones constructivas de envolvente, bajo condiciones realistas y a nivel de edificio. A veces se utilizan dos recintos o dos edificios gemelos, uno de los cuales se utiliza como referencia y en el otro se implementan modificaciones para su evaluación experimental. (2) Recintos cuyo diseño no pretende tener similitud con un edificio real, sino que se den las condiciones óptimas para el ensayo y el análisis de soluciones constructivas, proporcionando resultados fiables.

Las principales aplicaciones son las siguientes: (1) Caracterización del comportamiento energético de componentes constructivos. La información obtenida puede ser utilizada para la clasificación de las diferentes soluciones constructivas. Se describen trabajos llevando a cabo esta caracterización mediante ensayos comparativos. Esta es la metodología más extendida a nivel Nacional. En otros casos la caracterización se realiza mediante la obtención de parámetros intrínsecos aplicando técnicas de modelado inverso, que permite obtener resultados válidos con independencia de las condiciones meteorológicas de los ensayos. Esta metodología no está muy extendida a nivel Nacional, pero sin embargo su desarrollo tiene una larga trayectoria en un contexto de colaboración internacional. (2) Obtención de modelos de soluciones constructivas que faciliten la integración de estos sistemas en modelos de simulación de edificios integrando estas soluciones constructi-

vas. Se puede llevar a cabo mediante técnicas de identificación de sistemas que utilizan exclusivamente series de medidas experimentales. También se pueden utilizar modelos de simulación construidos inicialmente a partir de información geométrica y propiedades térmicas teóricas de los materiales constructivos, y calibrados a partir de datos experimentales.

En cuanto a las metodologías aplicadas, se distinguen principalmente las siguientes: (1) Evaluaciones cualitativas basadas en la representación gráfica de variables y discusión de tendencias observadas, a partir de los datos obtenidos mediante campañas experimentales. (2) Ensayos comparativos, mediante el ensayo de diferentes diseños en dos o más recintos, edificios, o habitaciones individuales idénticas en el mismo edificio. (3) Caracterización de componentes y sistemas constructivos mediante parámetros intrínsecos obtenidos a través de modelado empírico basado técnicas de identificación de sistemas.

# Laboratorio de ensayos Energéticos para Componentes de la Edificación (LECE) de la Unidad de I+D UiE3 del CIEMAT

Tipos de recintos, metodologías y casos de estudio

UNIDAD DE I+D SOBRE EFICIENCIA ENERGÉTICA EN LA EDIFICACIÓN (UiE3). CIEMAT

**M.J. Jiménez (1), J.D. Guzmán (2), M.N. Sánchez (3), R. Olmedo (4), S. Castaño (5), M.R. Heras (6)**

(1,6) Dra. CC. Físicas. Unidad de I+D sobre Eficiencia Energética en la Edificación del CIEMAT, Madrid.

(2) Ingeniero Téc. de Telecomunicaciones. Unidad de I+D sobre Eficiencia Energética en la Edificación del CIEMAT, Madrid.

(3) Dr. Ingeniero Industrial. Unidad de I+D sobre Eficiencia Energética en la Edificación del CIEMAT, Madrid.

(4) Ingeniero Industrial. Unidad de I+D sobre Eficiencia Energética en la Edificación del CIEMAT, Madrid.

(5) Ayudante de Investigación. Unidad de I+D sobre Eficiencia Energética en la Edificación del CIEMAT, Madrid.

Persona de contacto/Corresponding author: [mjose.jimenez@psa.es](mailto:mjose.jimenez@psa.es) (M.J. Jiménez)

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5441-5346> (M.J. Jiménez); <http://orcid.org/0000-0002-0070-4687> (J.D. Guzmán); <http://orcid.org/0000-0002-0704-2989> (M.N. Sánchez); <http://orcid.org/0000-0002-7803-2278> (R. Olmedo); <http://orcid.org/0000-0003-4571-769X> (S. Castaño); <http://orcid.org/0000-0001-8623-7479> (M.R. Heras)

## Laboratorio de ensayos Energéticos para Componentes de la Edificación (LECE) de la Unidad de I+D UiE3 del CIEMAT: Tipos de recintos, metodologías y casos de estudio

### RESUMEN

Este artículo presenta las instalaciones del Laboratorio de ensayos Energéticos para Componentes de la Edificación (LECE), y la metodología de caracterización experimental de componentes constructivos que desarrolla. Esta infraestructura permite ensayar sistemas constructivos de tamaño real, y su sustitución con relativa facilidad, permite ensayar componentes muy diversos. Los recintos de ensayo disponibles tienen de un alto nivel de instrumentación que permite un gran control del ambiente interior, que habitualmente no son viables en edificios habitados. Son especialmente útiles para ensayar sistemas y componentes constructivos cuya complejidad dificulta su caracterización teórica, o bien aquellos cuyo proceso de fabricación, construcción o escalado es susceptible de introducir desviaciones respecto a las especificaciones de diseño. También son útiles para componentes cuya naturaleza impide su ensayo y caracterización mediante otras técnicas tradicionales. Esta metodología también permite obtener modelos empíricos de los sistemas constructivos para su modelización en programas de simulación energética de edificios.

**Palabras clave:** Envolvente constructiva; Parámetros térmicos; Ensayos de intemperie; Ensayos in-situ; Caracterización de envolventes; Modelado empírico; Monitorización de edificios; Desempeño energético de edificios; Confort térmico.

## *Outdoor Laboratory for Energy testing of Building Components (LECE) from the UiE3 CIEMAT's R&D Unit: Type of test cells, methodologies and case studies*

### ABSTRACT

*This paper presents the test facilities of the Laboratory for testing Energy Performance of Building Components "(LECE)", and the developed methodology for experimental performance assessment of building components. This test facility is enabled for testing full size building components, and their relatively easy replacement, making possible testing a wide diversity of building components. The indoor environments of the available test rooms are highly controlled and instrumented which is not feasible in in-use buildings. These devices are mainly useful for testing building systems and components which complexity makes difficult their theoretical characterization, and also those whose manufacturing, construction or scaling process is prone to introduce deviations from their design specifications. They are also useful to test components that can't be tested using others traditional techniques. This methodology is also applicable to obtain empirical models of the construction systems to integrate them into building energy simulation models for buildings containing these systems.*

**Keywords:** *Building envelope; Thermal parameters; Outdoor tests; In-situ tests; Envelope energy assessment; Empirical modeling; Building monitoring; Building energy performance; Thermal comfort.*



## 1. Introducción

El elevado consumo energético que en la actualidad se emplea en el acondicionamiento térmico de edificios y la elevada tasa de emisiones de contaminantes que ello supone, hace necesario abordar actuaciones que conduzcan a reducir este consumo y las correspondientes emisiones contaminantes. La disponibilidad de herramientas fiables de diseño y de evaluación del desempeño energético de los edificios construidos, así como la normativa, se consideran muy importantes respecto a la consecución de estos objetivos. Sin embargo, existen problemas que deben ser resueltos en el ámbito científico para poder abordar actuaciones que tengan un impacto eficaz en cuanto a la reducción del consumo energético en el acondicionamiento de los edificios, la reducción de las emisiones y la lucha contra el cambio climático.

La medida experimental de componentes y sistemas constructivos, y de edificios a escala real, juega un papel muy importante de cara a la actividad científica necesaria en este contexto. Este trabajo experimental es particularmente relevante a la hora de cuantificar, entender y resolver los problemas asociados a las discrepancias entre el comportamiento energético basado en simulaciones y el real, que en la actualidad está siendo objeto de múltiples iniciativas científicas (1).

La monitorización de los edificios permite evaluar diferentes aspectos, existiendo diferentes metodologías experimentales para analizar el comportamiento energético de los edificios y de sus componentes. Estos procedimientos permiten evaluar el comportamiento energético del edificio en condiciones reales de uso, eliminando ciertos problemas debidos a las discrepancias existentes con los modelos teóricos (2). Sin embargo, la monitorización de los edificios en condiciones reales de uso tiene ciertas limitaciones en cuanto al nivel de detalle con el que se puede llevar a cabo la monitorización, y a las condiciones bajo las que se pueden realizar las campañas experimentales. Estas limitaciones se deben principalmente a que las monitorizaciones llevadas a cabo en edificios en condiciones reales de uso deben ser no intrusivas, lo que introduce ciertas restricciones en cuanto al número y ubicación de los sensores que es posible utilizar. Por

otra parte, las monitorizaciones en condiciones reales de uso también están limitadas en cuanto a la posibilidad de aplicar determinadas secuencias en el aporte de calor que faciliten el análisis experimental pero que, sin embargo, pueden llevar a los recintos fuera de las condiciones de confort, y por tanto no son viables para edificios en condiciones reales de uso.

Como complemento a las actividades de monitorización de los edificios (3), la Unidad de I+D sobre Eficiencia Energética en la Edificación (UiE3) del CIEMAT realiza ensayos en el Laboratorio de ensayos Energéticos para Componentes de la Edificación (LECE) en la Plataforma Solar de Almería. Estas instalaciones permiten estudiar y cuantificar de manera fiable el desempeño energético de los elementos de la envolvente y de otros sistemas constructivos bajo condiciones climáticas reales (4). Se dispone de dispositivos que permiten realizar campañas experimentales en diferentes escalas, desde componentes constructivos hasta edificios reales vacíos y en uso.

Este artículo describe la infraestructura experimental del LECE y sus aplicaciones. También se introducen los proyectos de investigación en los que ha intervenido, y las metodologías desarrolladas y aplicadas, haciendo énfasis a las principales aportaciones de este grupo al desarrollo de esta metodología. Esta descripción no incluye los dispositivos de medida utilizados, ya que éstos se describen con detalle en el artículo de este grupo en el capítulo denominado Información de este libro (5).

## 2. Proyectos

La infraestructura del LECE se ha desarrollado a través de la participación de la UiE3 del CIEMAT en proyectos de investigación, redes de trabajo, grupos de expertos de la “*International Energy Agency (IEA)*”, etc., sobre caracterización de componentes y sistemas constructivos. Concretamente los recintos de ensayo tipo PASSYS y PASLINK que se describen en la sección 3.1, se crearon en el marco de los proyectos PASSYS I (1986-1989), PASSYS II (1989-1992), COMPASS (1992-1995) y PASLINK (1992-1994) financiados por la Unión Europea. Posteriormente esta infraestructura

se ha ido ampliando y actualizando, incorporando los elementos que se describen en las secciones 3.2 a 3.5. Actualmente el LECE forma parte de las Instalaciones que integran la Plataforma Solar de Almería (PSA) catalogada como Instalación Científica y Técnica Singular (ICTS) por el Ministerio de Ciencia e Innovación, y como “*Large European Scientific Installation*” según la clasificación de la Comisión Europea.

En este contexto de colaboración internacional también se han desarrollado metodologías de caracterización de componentes y sistemas constructivos mediante técnicas de identificación de sistemas, a partir de ensayos realizados bajo condiciones meteorológicas reales y por tanto en régimen dinámico. La UIE3 del CIEMAT ha participado muy activamente en este desarrollo, haciendo énfasis en la resolución de problemas que se observan al aplicar la metodología común a la caracterización de componentes constructivos en ubicaciones con altos niveles de radiación solar.

Además de la obtención de los parámetros característicos intrínsecos de componentes y sistemas constructivos mediante técnicas de identificación de sistemas, la infraestructura del LECE permite realizar ensayos para la verificación, la calibración y la validación de modelos de simulación, análisis de tendencias, y ensayos comparativos.

Esta infraestructura ha dado soporte experimental a diferentes proyectos desarrollados en colaboración con empresas y otros centros de investigación nacionales e internacionales, que han sido financiados por la Unión Europea, el Ministerio de Ciencia e Innovación, diferentes Comunidades Autónomas y Ayuntamientos, o grupos de trabajo de los Programas de la Agencia Internacional de la Energía. A continuación se citan los proyectos más relevantes:

- PV-HYBRID-PAS (JOR3-CT96-0092). 1996-1998. *Development of procedures for overall performance evaluation of hybrid photovoltaic building components*. Financiado por la Unión Europea.
- APISCO (JOR3-CT96-0115). 1996-1998. *Application of plants to improve summer thermal comfort in buildings*. Financiado por la Unión Europea.
- ARCHINT. (JOR3-CT-98-7048). 1999-2001. *Architectural Integration of solar systems in buildings*. Financiado por la Unión Europea.

- IQ-TEST (CONTRACT N°: ERK6-CT1999-20003). 2000-2003. *Improving Quality in Test and Evaluation procedures of Solar and Thermal performances of building components*. Financiado por la Unión Europea.
- PSE-ARFRISOL (PS-120000-2005-1). 2005-2012. Proyecto tecnológico singular y de carácter estratégico sobre arquitectura bioclimática y frío solar (6). Financiado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades.
- OMEGA-CM (S2013/MAE2835). 2014-2018. Medidas de calidad y no intrusivas para la evaluación y optimización energética de edificios existentes con elementos constructivos avanzados (7). Financiado por la Comunidad de Madrid.
- Annex 58 (2011-2016, *Reliable Building Energy Performance Characterisation based on Full Scale Dynamic Measurements* (8)) y Annex 71 (2016-2021. *Building energy performance assessment based on in-situ measurements* (9)) ambos del “Programa Energy in Buildings and Communities (EBC)” de la Agencia Internacional de la Energía (IEA).
- In-Situ-BEPA-MAS (PID2019-105046RB-I00). 2020-2023. *Building Energy Performance Assessment based on In-Situ Measurement, Analysis and Simulation*. Financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación.

### 3. Infraestructura experimental del lece

El Laboratorio de ensayos Energéticos para Componentes de la Edificación (LECE) dispone de recintos de ensayo y otros dispositivos que permiten llevar a cabo la caracterización energética de componentes y sistemas constructivos bajo condiciones meteorológicas reales. Estos dispositivos, que se describen en las siguientes secciones, son:

- Recintos de ensayo tipo PASLINK, CESPAN y CETeB.
- Chimenea Solar.
- Edificio Monozona.
- Edificio ARFRISOL.
- Estación meteorológica.

### 3.1. Recintos de ensayo

El LECE dispone de cinco recintos de ensayo. El diseño de estos recintos no pretende tener similitud con un edificio real, sino que se den las condiciones óptimas para el ensayo de soluciones constructivas, que faciliten el análisis de los datos y la fiabilidad de los resultados.

Cada uno de estos recintos tiene una habitación con alto aislamiento térmico y una habitación auxiliar que aloja equipos de adquisición de datos. Están situados en un área abierta, amplia, sin sombreados, y separados para que no se afecten entre sí. La fachada sur de la habitación de ensayo, y en algunos casos el techo, se puede sustituir por el componente a ensayar. Estos recintos permiten incorporar sistemas constructivos de tamaño real, y la sustitución de estos sistemas con relativa facilidad permite realizar campañas experimentales de soluciones constructivas muy diversas. Además, disponen de un alto nivel de control del ambiente interior y de instrumentación del mismo, lo cual habitualmente no es viable en edificios habitados por ser altamente intrusivo y caro. Todos los recintos tienen estas características básicas, pero dos de ellos presentan algunas diferencias que se describen en las secciones 3.1.1 y 3.1.2.

#### 3.1.1. Recinto de ensayo tipo PASLINK

El recinto de ensayo tipo PASLINK incorpora el concepto de la envolvente pseudoadiabática “*Pseudo-Adiabatic Shell (PAS)*”. Este sistema detecta el flujo de calor a través de la envolvente de la habitación de ensayo mediante un sistema basado en una termopila, y lo compensa mediante un dispositivo calefactor incorporado en la envolvente (Figura 1). La superficie interior de la habitación de ensayo está cubierta por una lámina de aluminio que homogeniza la temperatura de la superficie interior evitando puentes térmicos. La habitación de ensayo tiene un techo intercambiable que permite el ensayo de componentes horizontales. El recinto está instalado sobre un dispositivo que permite su rotación haciendo posible realizar ensayos en diferentes orientaciones.

#### 3.1.2. Recinto de ensayo CETeB

El CETeB (Figura 2) es un recinto para el ensayo de techos. Su diseño resuelve problemas prácticos asociados a estos ensayos, como la accesibilidad y la resistencia estructural.

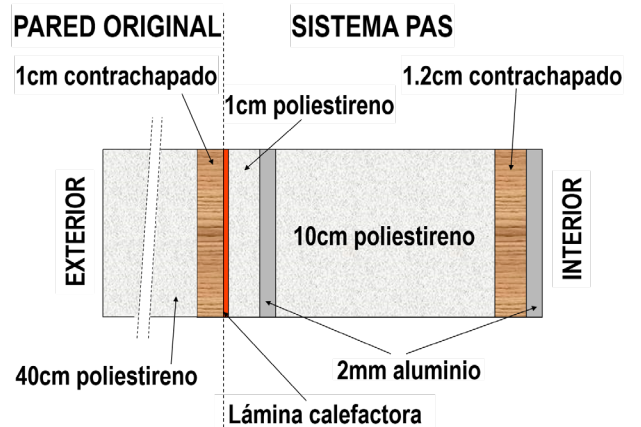


Figura 1. Recinto de ensayo tipo PASLINK y detalle de sus paredes



Figura 2. Recinto de ensayo tipo CETeB

Para ello se ha construido una habitación de ensayo semienterrada cuyo diseño tiene en cuenta los siguientes aspectos:

- Accesibilidad al techo ensayado que está aproximadamente a un metro de altura sobre el nivel del suelo, facilitando instalación, supervisión y mantenimiento.
- Estructura soporte suficientemente resistente para que se pueda ensayar cualquier tipo de techo.
- Habitación de ensayo sellada y aislada térmicamente con respecto al exterior.
- Sistema de calefacción y refrigeración flexible, con aporte de energía medible y controlable desde el sistema de adquisición de datos.

### 3.2. Chimenea Solar

El LECE dispone de un prototipo de chimenea solar monitorizado desde su construcción en 2003 bajo condiciones meteorológicas reales. Se construyó para dar soporte a trabajos de investigación sobre modelado empírico y validación de modelos teóricos.

Las dimensiones de la pared del absorbedor de la chimenea solar son de 4.5 m de alto, 1.0 m de ancho y 0.15 m de espesor con un canal de aire de 0.3 m de profundidad y una cubierta de vidrio de 4 mm de espesor. Tanto el área de entrada como la de salida son de 0.25 m<sup>2</sup> y la entrada de aire se encuentra a una altura de 0.5 m del suelo. El flujo de aire de entrada está colimado por una matriz laminada para que el flujo de aire esté solo en la dirección x.

La información sobre los equipos de medida se incluye en el artículo de este grupo, en el capítulo Información de este libro (5), que muestra algunas figuras y esquemas del sistema.

### 3.3. Edificio Monozona

Se dispone de un pequeño taller de 31.83 m<sup>2</sup> de área. Sus dimensiones externas son: 4.60 m de ancho, 6.95 m de largo y 3.65 m de alto (Figura 3). Es un edificio monozona situado en un área libre de obstáculos y otros edificios que pudieran sombrearlo, aparte de un edificio similar situado a 2 m de su fachada este. Se utiliza como taller de instrumentación y se está monitorizando en condiciones reales de uso. Además, permite realizar campañas experimentales con el edificio vacío.

Dispone de un sistema muy completo de medida de variables energéticas y climáticas tanto en su interior como en su entorno próximo. Incluye los siguientes elementos:

- Orientación sur.
- Dispositivos fijos de control solar, que evitan la ganancia solar en verano y la maximizan en invierno.
- Ventanas con vidrio doble.
- Ventanas dispuestas diagonalmente en una configuración norte-sur para producir ventilación natural.
- Envoltente con masa térmica.
- Aislamiento exterior.
- Techo alto.

La simplicidad de este edificio facilita su monitorización detallada y exhaustiva, estableciendo secuencias de acondicionamiento específicas que simplifican su análisis y su uso para el desarrollo y la mejora de metodologías de evaluación energética experimental de edificios.

### 3.4. Edificio C-Ddi ARFRISOL

Uno de los cinco edificios demostradores construidos en el marco del proyecto PSE-ARFRISOL está en la Plataforma Solar de Almería y forma parte del LECE. Este edificio (Figura 4), al igual que todos los edificios construidos en el marco de este proyecto, es un edificio de oficinas con aproximadamente 1000 m<sup>2</sup> de área construida, en condiciones reales de uso y monitorizado en continuo desde 2008. Estos edificios demostradores están diseñados para minimizar el consumo energético en acondicionamiento, manteniendo niveles óptimos de confort. Con este objetivo, incluyen estrategias pasivas de ahorro energético basadas en el diseño arquitectónico y la construcción, e integran sistemas solares activos que aportan la mayor parte de la demanda energética, que es baja. Por último, dispone de un sistema de climatización convencional que aporta la baja demanda que no puede ser aportada mediante energías renovables.

Estos edificios poseen instrumentación la cual proporciona medidas de alta calidad, que se registran con el fin de dar apoyo a actividades de investigación sobre confort térmico, y evaluación energética de envolventes y otros sistemas de acondicionamiento pasivos y activos (10).



Figura 3. Edificio Monozona



Figura 4. Edificio C-DdI ARFRISOL

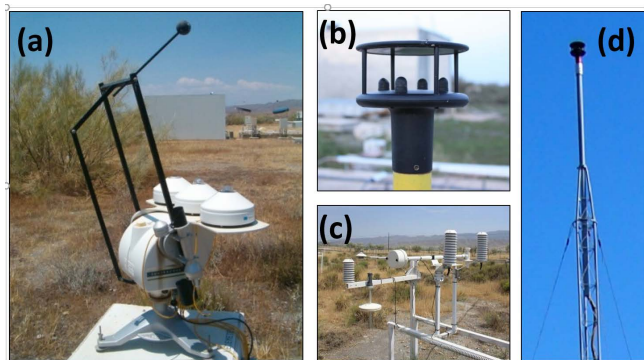


Figura 5. Dispositivos meteorológicos. (a) Sensores de radiación. (b) y (d) Anemómetro sónico. (c) Sensores de temperatura y humedad.

### 3.5. Estación meteorológica y otras medidas climáticas

Se dispone de dispositivos para la medida de las siguientes variables meteorológicas (Figura 5): Radiación directa, difusa, global horizontal y global vertical (norte y sur), radiación de onda larga (horizontal y vertical), temperatura de aire, humedad relativa, velocidad y dirección de viento, presión atmosférica, temperatura del terreno y concentración de  $\text{CO}_2$ . Para la mayoría de estas variables existe un registro de 10 años de datos de alta calidad con medidas realizadas cada minuto. Estos datos meteorológicos han permitido llevar a cabo múltiples análisis de caracterización climática, relevantes para evaluar el comportamiento energético real de los edificios, y también están disponibles para futuros trabajos de investigación.

## 4. Metodología

Estas instalaciones experimentales tienen múltiples aplicaciones. A continuación se citan las más habituales.

- Ensayos de caracterización del comportamiento térmico de los componentes constructivos, que conducen a la obtención de parámetros intrínsecos de estos componentes a partir de ensayos realizados bajo condiciones meteorológicas reales, y por tanto dinámicas, que requieren de la aplicación de técnicas de identificación de sistemas y modelado empírico (11). La metodología aplicada se describe más detalladamente en la sección 4.1.
- Verificación, calibración y validación de modelos de simulación (12-13). El artículo de la UiE3 del CIE-MAT en este libro en el capítulo de Edificios incluye más información sobre esta metodología (3).
- Evaluaciones cualitativas basadas en la representación gráfica de variables medidas y discusión de tendencias observadas, a partir de campañas experimentales realizadas en cualquiera de las instalaciones descritas.
- Ensayos comparativos que se pueden llevar a cabo en la mayoría de estas instalaciones, mediante el ensayo de diferentes diseños en dos o más recintos, edificios, o habitaciones individuales idénticas en el mismo edificio.

#### **4.1. Caracterización mediante modelado empírico: Técnicas de identificación de sistemas**

La principal aplicación de los recintos de ensayo presentados en la sección 3.1 es la caracterización de componentes y sistemas constructivos mediante modelado empírico basado en técnicas de identificación de sistemas, a partir de los datos registrados en los ensayos realizados en estos recintos bajo condiciones meteorológicas reales. Estas caracterizaciones conducen a la obtención de parámetros intrínsecos de los componentes y sistemas constructivos. La metodología de análisis de datos es aplicable a estos tipos de ensayos:

- Ensayos calorimétricos donde la caracterización se realiza mediante la medida indirecta del flujo neto a través del componente. Esto requiere el uso de instrumentación y unos recintos de ensayo diseñados específicamente para llevar a cabo esta medida de una forma fiable tales como el recinto tipo PASLINK (sección 3.1.1). La principal utilidad de estos ensayos es su aplicación a paredes y techos completos no homogéneos.
- Ensayos a nivel de componente mediante medida del flujo neto a través del componente. Estos ensayos son aplicables a componentes homogéneos y opacos instalados en cualquiera de los recintos de ensayo que se describen en la sección 3.1. En este caso, la metodología también es aplicable a ensayos in-situ en edificios reales, aunque el uso de recintos de ensayo permite reducir las incertidumbres de los resultados.

La principal utilidad de estos ensayos es llevar a cabo una caracterización fiable de componentes cuya complejidad dificulta esta caracterización de manera teórica, o bien aquellos cuyo proceso de fabricación, construcción o escalado es susceptible de introducir desviaciones respecto a las especificaciones de diseño. Estos ensayos también son de utilidad para componentes cuya naturaleza impide que se puedan ensayar y caracterizar mediante otras técnicas tradicionales. Por último, también permiten la obtención de modelos empíricos de los sistemas constructivos ensayados que permitan su integración en programas de simulación energética de edificios que incorporen estos sistemas constructivos.

Al igual que en el caso de los edificios, la caracterización mediante el modelado empírico y la aplicación de

técnicas de identificación de sistemas requiere medidas de variables energéticas y climáticas que intervienen en el intercambio energético a través del componente a caracterizar. La caracterización se basa en el planteamiento de ecuaciones de balance energético bien en modo integral o bien en modo diferencial utilizando estas variables medidas.

Existen diversas técnicas con diferente complejidad para realizar el análisis, proporcionando resultados con diferente nivel de exactitud (14,11), que también presentan diferencias en cuanto al coste de las campañas experimentales que conducen a obtener los datos necesarios para realizar el análisis. Por otra parte el clima cálido y soleado, como es el de España y otros países del sur de Europa, complica la aplicación de los procedimientos desarrollados para el centro y norte de Europa. Esto ha llevado a la UIE3 del CIEMAT a realizar múltiples trabajos para la adaptación y creación de nuevos procedimientos fiables también para estas condiciones climáticas.

##### **4.1.1. Análisis basado en planteamiento integral**

La UIE3 del CIEMAT ha abordado la adaptación de la metodología de análisis basada en regresión lineal múltiple a partir de valores promedio de las medidas, mediante un Planteamiento Integral aplicable a componentes constructivos y edificios completos (3). Se consideran los aspectos dinámicos de la campaña experimental en el planteamiento inicial de las ecuaciones de balance energético de los edificios. Tras integrar estas ecuaciones, y utilizar valores medios como representación de la integral, se obtienen ecuaciones desde el punto de vista formal análogas a las estáticas, pero incluyendo los aspectos dinámicos. Los aspectos críticos e innovadores del procedimiento propuesto son la identificación de: (1) El mínimo periodo de integración (o promedio) óptimo, que en el caso de los métodos estáticos se suele considerar fijo, típicamente un día (lo cual puede dar lugar a resultados con altas incertidumbres). (2) Los principales efectos que contribuyen al balance energético de los recintos considerados, frente a los efectos despreciables.

La incorporación del punto de vista físico a estos análisis, donde la ecuación de balance energético en su forma integral tiene un papel fundamental, permite partir de un planteamiento óptimo, para obtener resultados más fiables que los que se habían obtenido hasta entonces considerando meramente la relaciones

estadísticas entre promedios de variables que proporciona la regresión lineal. Este planteamiento también proporciona criterios para minimizar el periodo mínimo de campaña experimental y las variables y equipos necesarios, y por tanto para la reducción de costes de la evaluación experimental. Esto es fundamental a la hora de plantear este tipo de evaluaciones a nivel comercial donde es relevante utilizar metodologías eficientes en cuanto a exactitud y coste.

Esta metodología se aplicó en el marco del proyecto PSE-ARFRISOL, a la caracterización energética de un muro homogéneo, opaco y sin aislamiento, al que posteriormente se le acopló una hoja cerámica transformando el sistema en una fachada ventilada. Los ensayos de este muro, y después de la fachada ventilada, se realizaron en un recinto de ensayo tipo CESPAN del LECE. Para el análisis del muro en su configuración inicial se consideraron periodos de integración de uno a diez días. Se observó una mejora relevante al aumentar el periodo de integración de uno a cinco días. Periodos de integración mayores no mostraron mejoras significativas. Se analizó la influencia de la radiación global, la radiación de onda larga y la velocidad de viento en el balance de la energía que atraviesa la superficie interior del muro. Para este caso de estudio, se identificó una influencia relevante de la velocidad de viento (15).

La mejora de los resultados con el aumento del periodo de integración se ha corroborado en estudios posteriores en los que se ha aplicado la misma metodología a muros homogéneos y opacos (16) y edificios completos (16, 17). En uno de estos trabajos (16) se ha realizado un estudio sistemático del método dinámico integrado considerando un edificio completo y cada una de sus paredes opacas. En el caso del techo y las restantes paredes opacas, este estudio concluye que modelos relativamente simples pueden proporcionar resultados fiables, mientras que una mayor complejidad no aporta mejoras significativas. Sin embargo se aprecian diferencias notables para los diferentes periodos de integración, desde la insuficiencia en promedios diarios hasta la optimización para periodos de integración de seis días. La información sobre el estudio realizado para el caso del edificio completo se resume en el artículo de la UiE3 del CIEMAT en este libro sobre Edificios (3).

#### 4.1.2. Análisis basado en planteamiento diferencial

Este grupo de investigación también ha abordado diferentes aspectos del modelado dinámico con un Planteamiento Diferencial. Se han desarrollado ampliamente metodologías y herramientas para la caracterización de los componentes constructivos bajo condiciones meteorológicas reales en un contexto de colaboración internacional (18, 20), donde la UiE3 del CIEMAT ha participado activamente (11, 14, 19).

Estos métodos dinámicos con planteamiento diferencial permiten reducir el tiempo de ensayo necesario para obtener resultados fiables a partir de ensayos realizados en condiciones meteorológicas reales y por tanto en régimen dinámico. Se basan en el planteamiento de ecuaciones dinámicas de balance energético de los sistemas físicos considerados, y la aplicación de técnicas de identificación de sistemas para obtener los parámetros de interés.

Es destacable la actividad desarrollada por el Grupo Europeo PASLINK en cuanto al desarrollo de procedimientos de ensayo y caracterización empírica de componentes constructivos bajo condiciones meteorológicas reales y la aplicación de técnicas de identificación de sistemas. La actividad más relevante de este grupo se resume en un número especial de la revista *Building and Environment* (20).

Este número especial incluye dos artículos con autoría de la UiE3 del CIEMAT sobre metodología de análisis de datos para la caracterización térmica de componentes constructivos. Una de estas referencias presenta una recopilación de los modelos que pueden aplicarse para obtener las características térmicas de los edificios y los componentes constructivos a partir de ensayos llevados a cabo en condiciones meteorológicas reales (14). Esta referencia presenta y compara varios modelos, y demuestra matemáticamente la relación entre un conjunto de modelos estocásticos lineales y estacionarios ampliamente utilizados, destacando las características de cada tipo de modelo. También se considera un caso de estudio que demuestra la diferencia entre modelos lineales y no lineales.

En el marco de trabajo del Grupo Europeo PASLINK se han desarrollado varias herramientas tales como LORD (21) que emplea modelos RC para la caracteri-

zación térmica de los componentes constructivos a partir de campañas experimentales realizadas en recintos de ensayo. También se han desarrollado metodologías para realizar este análisis utilizando herramientas comerciales tales como la “System Identification Toolbox (SIT)” de MATLAB. En este caso, para la caracterización se suelen utilizar modelos ARX (19).

Todo el trabajo realizado sobre caracterización de componentes en recintos de ensayo, ha constituido un punto de partida importante para trabajos posteriores, con el objetivo de ampliar del rango de aplicación de estas técnicas a la caracterización de envolventes de edificios completos (22). Algunos de estos trabajos se resumen en el artículo de la UiE3 del CIEMAT en este libro sobre edificios (3). La misma metodología también se ha aplicado al modelado de otros sistemas constructivos tales como módulos fotovoltaicos integrados (23).

Las secciones 4.1.3 a 4.1.6 presentan algunas de las aportaciones más relevantes en cuanto a la contribución del CIEMAT al desarrollo de esta metodología y su aplicación.

#### **4.1.3. Selección de entradas y salidas**

Uno de los aspectos que deben abordarse tanto en los métodos integrales como en los diferenciales, es la correcta asignación de entradas y salidas una vez planteada la ecuación de balance energético. Esta asignación también debe basarse en criterios de la física tales como la causalidad y las correlaciones que pudieran existir entre las variables medidas. A veces esta asignación es evidente y es posible obtener resultados fiables a partir de modelos con una única salida. Otras veces esto se consigue mediante el diseño del experimento incorporando determinadas secuencias en el aporte de energía (24), que excitan al sistema y eliminan ciertas correlaciones entre variables. Sin embargo, en algunos casos la utilidad de estas secuencias es muy limitada. Este es el caso cuando la diferencia de temperatura entre el interior y el exterior es baja y el nivel de radiación solar es alto. El problema se ve empeorado cuando la envolvente a caracterizar tiene un alto nivel de aislamiento. Bajo estas condiciones la amplitud de la secuencia de calefacción se ve limitada drásticamente y por tanto resulta poco efectiva para excitar al sistema y decorrelacionar las variables, lo cual dificulta la identificación de los parámetros característicos. Este problema es muy

frecuente, incluso en invierno, en ensayos realizados en emplazamientos con clima cálido y soleado tales como el sur de España.

El uso de modelos con salida múltiple se ha mostrado como alternativa útil para resolver estos problemas. Se aplicó al análisis de dos configuraciones (con y sin ventana), de un componente de referencia homogéneo y opaco ensayado en el LECE en el marco del proyecto IQ-TEST (25).

#### **4.1.4. Ensayos en clima cálido y soleado**

La mayor parte de las técnicas de identificación de sistemas que se aplican a la caracterización de componentes constructivos consideran modelos lineales con parámetros constantes. La posibilidad de incluir parámetros dependientes del tiempo y términos no lineales amplía su flexibilidad y utilidad. Un ejemplo de aplicación de modelado no lineal es la resolución de ciertos problemas observados en la caracterización de un componente que incluye una ventana ensayado en un recinto de ensayo en clima cálido y soleado (26). En este caso se obtenían resultados absurdos desde el punto de vista físico al utilizar modelos basados en las aproximaciones lineales tradicionales. Sin embargo, se obtuvieron valores de UA y gA muy realistas y fiables, incluyendo un término no lineal representando el efecto del intercambio de radiación de onda larga en las superficies interiores del recinto como condición de contorno (Figura 6).

El efecto no lineal incluido se explica como corrección de errores sistemáticos debidos a pequeñas perturbaciones inevitables en los sensores de temperatura, presentes incluso utilizando elementos protectores de radiación. El intercambio de radiación de onda larga modelado no sería lógico entre superficies interiores y aire, pero sí lo es considerando el sensor de temperatura de aire como elemento cuya superficie intercambia radiación de onda larga con su entorno. Este efecto se acentúa bajo ciertas condiciones de ensayo en climas soleados, cuando la radiación solar calienta grandes superficies interiores produciendo alta diferencia de temperatura entre estas superficies y el aire, e intercambio no despreciable de radiación de onda larga entre el sensor de temperatura de aire y las superficies que lo rodean.



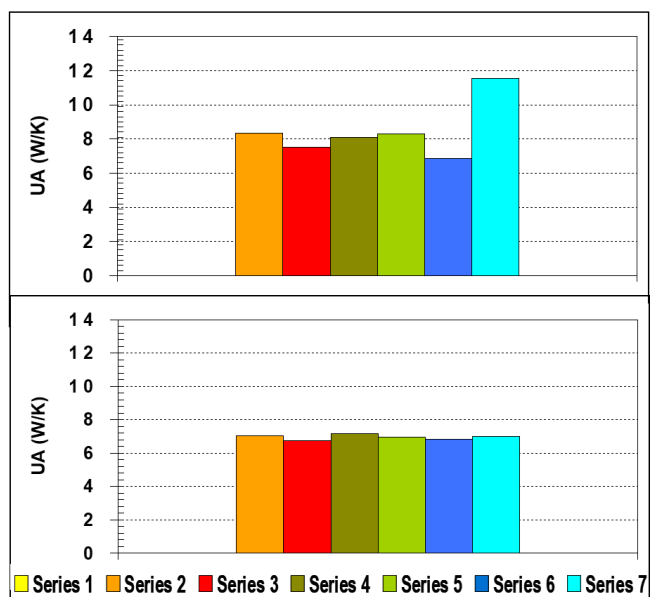


Figura 6. Coeficiente UA de un componente con ventana ensayado en el recinto PASLINK del LECE. Arriba discrepancias inverosímiles entre series para modelo lineal. Abajo resultados coherentes entre series, mediante un modelo no-lineal de la radiación de onda larga.

#### 4.1.5. Validación de modelos

La validación es un aspecto importante en esta metodología. Si los resultados obtenidos a partir de un modelo concreto no cumplen los criterios de validación, tanto el modelo como los resultados obtenidos con el mismo deben ser rechazados.

La validación se puede abordar mediante diferentes criterios complementarios físicos y estadísticos. Los estadísticos permiten comparar el comportamiento entre diferentes modelos, e identificar cuales tienen mejor o peor comportamiento. Sin embargo, la selección final de un modelo concreto a la hora de utilizarlo para obtener resultados finales debe basarse en la coherencia física de los resultados. A continuación, se citan los criterios de validación utilizados habitualmente.

- Rango y comportamiento de los residuos: Residuos con una amplitud pequeña (en el rango de incertidumbre de la medida) y comportamiento de ruido blanco son indicadores de la bondad del modelo. Si no se trata de ruido blanco, el análisis de estos residuos puede facilitar el diagnóstico de las causas de este mal comportamiento de los modelos y proporcionar criterios para su mejora.
- Coherencia de resultados obtenidos mediante diferentes series de datos obtenidos bajo diferentes condiciones de ensayo, que deben coincidir salvo

pequeñas diferencias atribuibles a la incertidumbre en los parámetros.

- Coherencia de los resultados con valores obtenidos mediante otros métodos teóricos o experimentales.
- Verosimilitud de los resultados respecto al rango lógico de estos resultados en base a consideraciones físicas.

La simplicidad es otro factor a tener en cuenta a la hora de seleccionar un modelo, ya que facilita su futura implementación, a nivel de investigación, comercial o normativo. Esto se debe a que, frecuentemente, simplicidad implica bajo coste del montaje experimental necesario para los ensayos, periodos de ensayo más cortos, o menor dedicación o nivel de cualificación necesarios para el análisis de datos.

#### 4.1.6. Análisis de incertidumbres

El análisis de incertidumbres se lleva a cabo de acuerdo a la "ISO Guide to the expression of uncertainty in measurement" (27), mediante un procedimiento adaptado a este tipo de ensayos y de acuerdo a esta guía (28-29).

## 5. Bibliografía

- (1) EBC Executive Committee. 2019. International Energy Agency. Strategic Plan 2019-2024. Energy in Buildings and Communities Technology Collaboration Programme.
- (2) W. Tian, Y. Heo, P. de Wilde, Z. Li, D. Yan, C.S. Park, X. Feng, G. Augenbroe. 2018. A review of uncertainty analysis in building energy assessment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 93, pp. 285–301.
- (3) UiE3-CIEMAT. 2020. Análisis Experimental de Edificios en la Unidad de I+D UiE3 del CIEMAT. Objetivos, metodologías y aplicaciones. Capítulo en este libro.
- (4) S. Castaño, J.D. Guzmán, M.J. Jiménez, M.R. Heras. 2016. “LECE-UiE3-CIEMAT”. Chapter of “Report of Subtask 1a: Inventory of full scale test facilities for evaluation of building energy performances”. (Editor: A. Janssens). IEA EBC Annex 58 Final Reports. ISBN: 9789460189906, Published by KU Leuven, Belgium.
- (5) UiE3-CIEMAT. 2020. Monitorización de Sistemas Constructivos, Edificios y Entornos Urbanos en la Unidad de I+D UiE3 del CIEMAT. Medida directa, indirecta e índices. Capítulo en este libro.
- (6) Proyecto PSE-ARFRISOL. [www.arfrisol.es](http://www.arfrisol.es) . Visto el 22/05/2020.
- (7) Programa OMEGA-CM. <http://projects.ciemat.es/web/omega-cm> . Visto el 22/05/2020.
- (8) Proyecto IEA EBC Annex 58. 2011-2016. <http://www.iea-ebc.org/projects/project?AnnexID=58>. Visto el 22/05/2020.
- (9) Proyecto IEA EBC Annex 71. 2016-2021. <http://www.iea-ebc.org/projects/project?AnnexID=71>. Visto el 22/05/2020.
- (10) M.N. Sánchez, S. Soutullo, R. Olmedo, D. Bravo, S. Castaño; M.J. Jiménez. 2020. An experimental methodology to assess the climate impact on the energy performance of buildings: A ten-year evaluation in temperate and cold desert areas. *Applied Energy*. 264, 114730.
- (11) M.J. Jimenez, et al. 2016. “Report of Subtask 3 – Part 1. Thermal performance characterization based on full scale testing - description of the common exercises and physical guidelines”. (Editor: M.J. Jiménez). IEA EBC Annex 58 Final Reports. ISBN: 9789460189876, Published by KU Leuven, Belgium.
- (12) R. Enríquez, M.J. Jiménez, M.R. Heras. 2017. Towards non-intrusive thermal load Monitoring of buildings: BES calibration. *Applied Energy*. 191, pp. 44–54.
- (13) B. Porcar; S. Soutullo; R. Enríquez, M.J. Jiménez. 2018. Quantification of the uncertainties produced in the construction process of a building through simulation tools: A case study. *Journal of Building Engineering*. 20, pp. 377-386.
- (14) M.J. Jiménez, H. Madsen. 2008. Models for Describing the Thermal Characteristics of Building Components. Número especial sobre ensayos de cerramientos en condiciones reales. *Building and Environment*. 43(2), pp. 152-162.
- (15) I. Naveros, M.J. Jiménez, M.R. Heras. 2012. Analysis of capabilities and limitations of the regression method based in averages, applied to the estimation of the U value of building component tested in Mediterranean weather. *Energy and Buildings*. 55, pp. 854-872.
- (16) K. Chávez, D.P. Ruiz, M.J. Jiménez. 2019. Dynamic integrated method applied to assessing the in-situ thermal performance of walls and whole buildings. Robustness analysis supported by a benchmark set-up. *Applied Thermal Engineering*. 152C, pp. 287-307.
- (17) L. Castillo, R. Enríquez, M.J. Jiménez, M.R. Heras. 2014. “Dynamic integrated method based on regression and averages, applied to estimate the thermal parameters of a room in an occupied office building in Madrid”. *Energy and Buildings*. 81, pp. 337-362.
- (18) DYNASTEE Network. [www.dynastee.org](http://www.dynastee.org). Visto el 18/05/2020.
- (19) Jiménez M.J., Madsen H., Andersen K. K. 2008. Identification of the Main Thermal Characteristics of Building Components using MATLAB. *Building and Environment*. 43(2), pp. 170-180.
- (20) P.A. Strachan, P.H. Baker. 2008. Special issue

- on outdoor testing, analysis and modelling of building components. EDITORIAL. Building and Environment, 43, pp. 127-128.
- (21) O. Gutschker. Parameter identification with the software package LORD. Special issue on Outdoor testing, analysis and modelling of building components. Building and Environment. 43(2), pp. 163-169.
- (22) H.P. Díaz-Hernández, P.R. Torres-Hernández, K.M. Aguilar-Castro, E.V. Macias-Melo, M.J. Jiménez. 2020. Data - Based RC Dynamic Modelling Incorporating Physical Criteria to Obtain the HLC of In-Use Buildings: Application to a Case Study. Energies. 13(2), 313.
- (23) M.J. Jiménez, H. Madsen, H. Bloem, B. Dammann. 2008. Estimation of Non-linear Continuous Time Models for the Heat Exchange Dynamics of Building Integrated Photovoltaic modules. Energy and Buildings. 40, pp. 157-167.
- (24) K.R. Godfrey. 1980. Correlation methods. Automatica, 16, pp. 527-534.
- (25) M.J. Jiménez, M.R. Heras. 2005. Application of multi-output ARX models to estimate the U and g values of building components from outdoors testing. Solar Energy. 79(3), pp. 302-310.
- (26) M.J. Jiménez, B. Porcar, M.R. Heras. 2008. Estimation of UA and gA values of building components from outdoor tests in warm and moderate weather conditions. Solar Energy. 82(7), pp. 573-587.
- (27) International Standardization Organization. ISO Guide to the expression of uncertainty in measurement. Ginebra, 1995. ISBN 92-67-10188-9.
- (28) PASLINK-EEIG. IQ-TEST FINAL TECHNICAL REPORT. IQ-TEST project, CONTRACT N°: ERK6-CT1999-20003, PROJECT N°: NNE5-1999-0511. 1st August 2003.
- (29) M.J. Jiménez. 2005. Caracterización de cerramientos constructivos mediante células de ensayo de Intemperie. Aplicación del cálculo de incertidumbres a la optimización de los ensayos. Tesis Doctoral. Universidad de Almería.



# Módulos experimentales en proyectos de investigación del Grupo SCHE-IETcc- CSIC

Proyectos REFAVIV, REVEN, RADON  
Pilot y Muro Trombe Termocrómico

SCHE-IETCC. CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS (CSIC)

I. Oteiza (1), C. Alonso(1), F. Martín-Consuegra (1), B. Frutos (1), B. Arranz (2), A. Gutiérrez (3), G. Pérez (4),  
A. Martínez (5)

(1) Dr. Arq. Investigador. Sistemas constructivos y Habitabilidad en la Edificación(SCHE). Instituto Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja(IETcc). CSIC, Madrid (España)

(2) Dra. Arq. Investigadora. Grupo TISE- Universidad Politécnica de Madrid, (España)

(3) Dr. Ing. T. Investigador. Grupo Robolabo-GEDIRCI. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid (España)

(4) Dra. CCFF Inversigadora. Grupo Reciclado de Materiales. IETcc-CSIC. España

(5) MCH. Arq. Doctorante ETSAM. Grupo TISE - Universidad Politécnica de Madrid, (España)

Persona de contacto/Corresponding author: [ioteiza@ietcc.csic.es](mailto:ioteiza@ietcc.csic.es) (I. Oteiza)

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7815-3109> (I. Oteiza)

## Módulos experimentales en proyectos de investigación del Grupo SCHE-IETcc-CSIC. Proyectos REFAVIV, REVEN, RADON Pilot y Muro Trombe Termocrómico

### RESUMEN

Se presentan en este trabajo cuatro proyectos en los que se han utilizado módulos experimentales/ celdas o recintos, en algunos casos construidos para el desarrollo de estos proyectos y en otros son módulos o celdas existentes. En los diferentes proyectos que se describen ha participado el grupo de investigación de Sistemas Constructivos y habitabilidad en la edificación del Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (SCHE-IETcc-CSIC). Los proyectos son REFAVIV (2016), REVEN (2017), RADÓN PILOT (2007) y MICET (2015), en los mismos se describen los equipos y características de las mediciones que se han utilizado para su monitorización.

**Palabras clave:** Monitorización módulos experimentales; REFAVIV; REVEN; RADON Plat; Muro trombe termocrómico.

## *Experimental modules in research projects of the SCHE-IETcc-CSIC Group. REFAVIV, REVEN, RADON-Pilot and Thermo-chromic Trombe Wall projects*

### ABSTRACT

*Four projects are presented in this work in which experimental modules / cells or rooms have been used, in some cases built for the development of these projects and in others they are existing modules or cells. The research group “Building systems and habitability (SCHE)” in the Eduardo Torroja Institute for Construction Science (IETcc), that belongs to the Spanish National Research Council has participated in the next projects : REFAVIV (2016), REVEN (2017), RADÓN PILOT (2007) and Muro Trombe Thermo-chromic –MICET (2015). Equipment and characteristics of the measurements that have been used for their monitoring are described.*

**Keywords:** *Monitoring experimental modules; REFAVIV; REVEN; RADON Plat; Thermo-chromic Trombe wall*

## 1. Introducción

Se presenta en este trabajo la descripción del uso de Recintos, Celdas o Módulos Experimentales, en diferentes proyectos de investigación, en los que ha participado el grupo de investigación de Sistemas Constructivos y Habitabilidad en Edificación (SCHE) del Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (IETcc) del Consejo Superior de Investigaciones (CSIC), en algunos casos los proyectos han sido desarrollados por varios grupos de investigación que se indican en cada uno de ellos.

Los proyectos de investigación que se describen en el trabajo son cuatro:

- 1.- REFAVIV- “Rehabilitación energética de las fachadas de viviendas sociales deterioradas en Madrid y Sevilla, aplicando productos innovadores nacionales y europeos (DIT y DITE)”- BIA-2012-39020-C02-01 -MINECO (1/2013-6/2016). IP: I. Oteiza
- 2.- REVEN- “Rehabilitación energética de viviendas sociales, aplicando productos innovadores de ventana con marcado CE.” BIA2014-56650-JIN. MINECO (10/2014-10/2017). IP: B. Arranz.
- 3.- RADON-Pilot- “Estudio de la viabilidad y la efectividad de las acciones de remedio frente a la presencia de gas Radón en los edificios existentes” BIA2004-01460 - MINECO. (2005-2007) IP: M. Olaya
- 4.- MICET-“ Desarrollo de un mortero de revestimiento inteligente basado en cementos eco-eficientes termocrómicos” BIA2014-56827-R. MINECO (2015-2018) IP: G. Pérez.

A continuación se describe de cada uno de los proyectos, las características de los módulos experimentales, las diferentes instalaciones y equipos, así como los datos que se han obtenido, de forma muy resumida, con el objeto de dar un panorama muy resumido de la parte de monitorización de cada proyecto, sin pretender abarcar los resultados, el análisis y las conclusiones de cada proyecto.

Al final del trabajo se presenta un apartado con una breve bibliografía o referencias en las que se puede profundizar de los proyectos expuestos.

## 2. REFAVIV.

BIA-2012-39020-C02-01 - (1/2013-6/2016)

Este proyecto surge ante la ineficiencia energética en el extenso parque de viviendas sociales existente, construido en España entre 1940 y 1980, periodo caracterizado por la inexistencia de normativa sobre ahorro de energía y acondicionamiento térmico, así como por los escasos medios con los que se contaba, ante la urgencia de resolver cuestiones prioritarias de índole social.

El estudio experimental de la investigación estaba conformado por una parte donde se analizaban los consumos energéticos y las condiciones higrotérmicas de varias viviendas en Madrid y en Sevilla, (esta parte se expone en otra ponencia como parte del grupo de trabajo 3- Edificios) y la parte de investigación con módulos experimentales, donde se estudiaron de forma controlada diferentes variables higrotérmicas y de consumo energético en 3 módulos experimentales, con diferente composición de fachada exterior, en la fachada sur, la celda M1 con una envolvente exterior compuesta por dos hojas, la primera hoja de ladrillo perforado, más cámara de aire más ladrillo de hueco enfoscado hacia el interior que corresponde al cerramiento exterior más utilizado en las viviendas sociales entre 1940 y 1980. Y los otros dos módulos, que simulan dos sistemas de rehabilitación de fachadas, el M2 un sistema de fachada ventilada y el M3 un sistema SATE, ambos sistemas se comercializan en el mercado y disponen de un Documento de Idoneidad Técnica vigente (DIT).

El estudio experimental que se describe en este trabajo tiene como objetivo caracterizar el desempeño de dos componentes innovadores M2 y M3 para el reacondicionamiento energético de los cerramientos exteriores opacos, mediante el estudio del consumo energético para calentar y/o enfriar para lograr el confort ambiental, comparándolo bajo condiciones controladas, con la envolvente tradicional (M1) de viviendas sociales en Madrid.

Los parámetros relacionados con el consumo de energía fueron monitorizados en diferentes estaciones del año. Los resultados sirvieron como base para calibrar modelos energéticos para simular la aplicación de estas soluciones a gran escala.



Fig. 1. Vista de los módulos M1, M2 y M3 del laboratorio GESLAB –Universidad Politécnica de Madrid en Montegancedo. (1)

Los módulos utilizados en esta investigación, pertenecen al laboratorio GESLAB (Fig. 1) del Grupo TISE de la Universidad Politécnica de Madrid que están ubicados en el área de Montegancedo- Madrid (1). Son cubos con una dimensión es de 3 m de arista exterior, con un espesor en las caras de 0,7 m (con material aislante de 0,60 m), dejando un espacio interior de 2,31 m x 2,16 m y una cara libre (hacia el sur) que permite colocar los diferentes cerramientos a ensayar (Fig. 2). Estos módulos permiten orientarlos, como requieran los ensayos, al disponer de ruedas.

El periodo de monitorización fue durante 476 días (desde el 27/5/2014 al 31/8/2015). La toma de datos se dividió en 11 periodos diferentes, 5 de ellos sin equipo control ambiental (aire acondicionado en verano o calefacción en invierno) y los otros 6 periodos con equipo de control ambiental, manteniendo una temperatura constante (de 21°C en invierno y 23°C en verano).

Las variables analizadas: Condiciones ambientales interiores (Temperatura int °C-T, Humedad relativa-Hr y calidad del aire-CO<sub>2</sub>) y condiciones exteriores (T ext, Hr%, precipitación y radiación solar).

Se instalaron diferentes sensores (T y HR), unos ubicados en el centro cada una de las superficies interiores de los cubos (M1, M2 y M3), se duplicaron algunos termopares en el interior de las capas, por si alguno fallaba. Otros en el centro cada recinto para el ambiente. Y termopares (tipo T, clase 1), en cada una de las superficies de las capas de la envolvente (Fig 3).

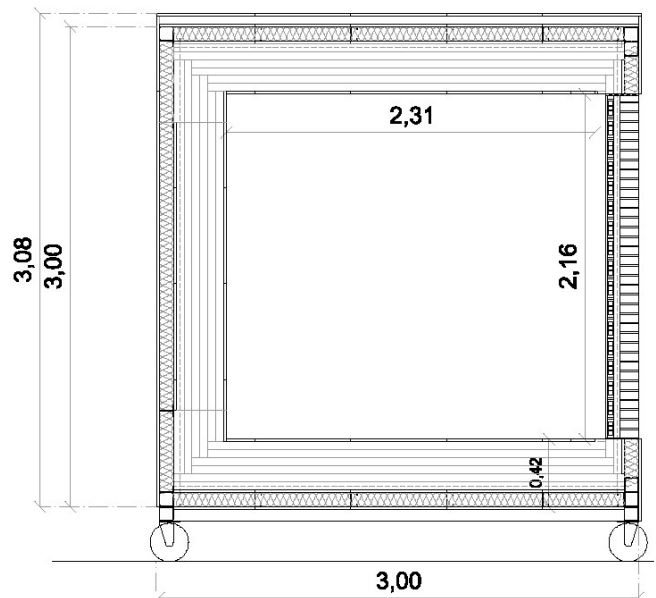


Fig. 2. Alzado y dimensiones del módulo.

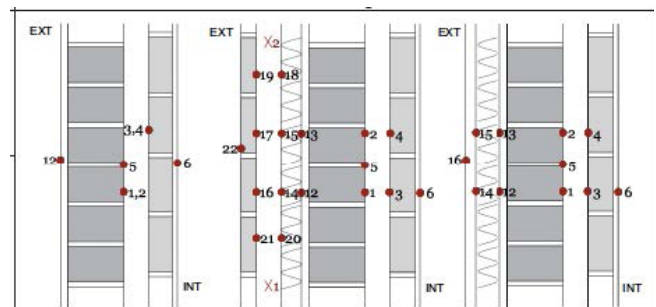


Fig. 3. Ubicación de los termopares en las capas de los tres módulos (2)



En el M2 – Fachada ventilada, se instaló un anemómetro para medir la velocidad del aire.

La temperatura ambiente en el centro de la celda, nos permitió conocer la Temperatura ambiente interior (Fig 4)

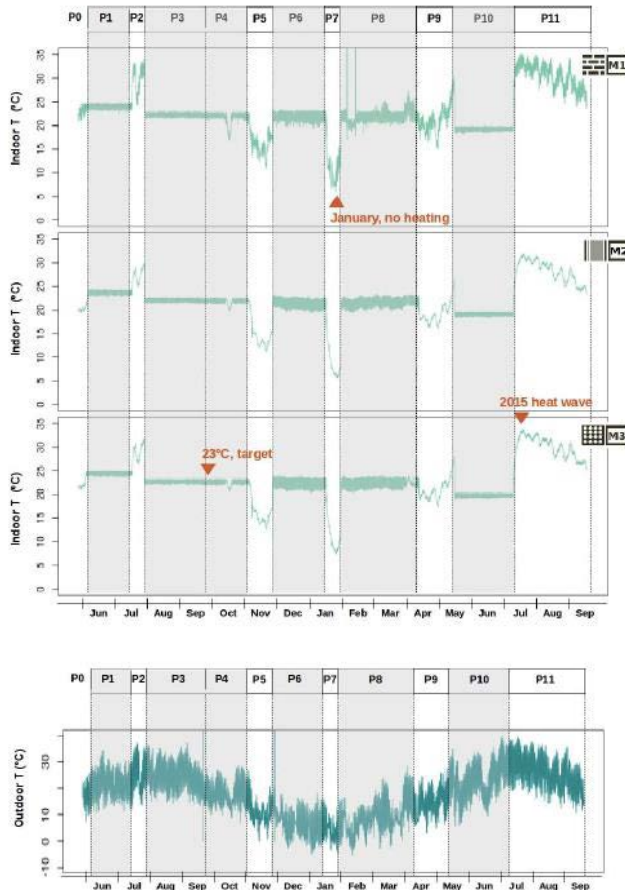


Fig. 4 Distribución de las temperaturas en los módulos M1, M2 y M3, en 11 periodos P1 al P11. Unos con temperatura de consigna (P1, P3, P4, P6, P8 y P10), los otros periodo son de libre fluctuación de la Temperatura interior- Parte baja Temperatura exterior en los diferentes periodos-

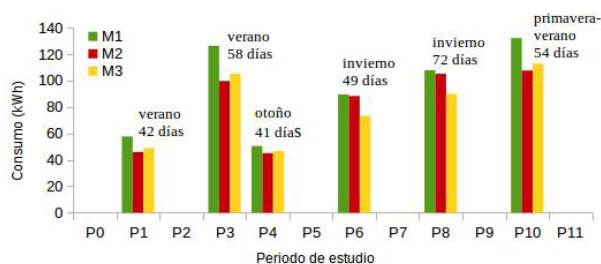


Fig. 5. Consumo energético (kWh) para calentar y enfriar los 3 módulos, en los diferentes periodos analizados. Con equipo de control ambiental.

Como parte de las conclusiones que se obtuvieron, está el estudio de los consumos energéticos (kWh) (Fig. 5) de cada uno de los sistemas de envolvente (M1, M2 y M3), durante los periodos con equipos activos.

Información más detallada de estos ensayos experimentales se puede obtener en la bibliografía que se indica al final del trabajo como REFAVIV.

### 3. REVEN- BIA2014-56650-JIN. MINECO (10/2014-10/2017)

Como continuación del proyecto de investigación REFAVIV, que estudiaba la envolvente opaca de las fachadas en los edificios de vivienda, expuesto en el apartado anterior, se planteó estudiar la incidencia de las ventanas en la rehabilitación energética de las viviendas sociales entre los años 1940-1980. Las ventanas se pueden considerar como elementos con gran incidencia en el consumo y, por tanto, con un gran potencial de ahorro energético asociado. En España, entre el 25 % y el 30 % de nuestras necesidades de calefacción se deben a las pérdidas de calor que se producen a través de las ventanas (4)

Para este estudio se construyó un módulo experimental con un sistema prefabricado compuesto por tableros con caras exteriores de fibra de madera e interior de partículas de madera aglomeradas y por aislamiento de algodón reciclado, con espesor de 0,63 m en terrenos del CSIC de Arganda del Rey (Fig. 6)

Esta construcción (Laboratorio REVEN) tiene una dimensión exterior de 7 m x 8 m, y está dividida en 3 recintos, uno de acceso donde se centralizan las diferentes instalaciones y dos recintos iguales de 5,68 m x 2,61 m, con orientación sur, donde se instalaron las ventanas que se ensayaron en esta investigación.

Se instalaron dos ventanas, con sus respectivos marcos, en la fachada sur, una que corresponde a un tipo de ventana que predomina en los conjuntos de viviendas sociales de los años 1940-1980, que se identifica como ventana de referencia y otra con características y prestaciones más actuales, con marcado CE, que se denomina optimizada, los materiales y sus características aparecen en la Tabla 1.



Fig. 6. Fotografías de diferentes etapas de la construcción del Laboratorio REVEN.

Tabla 1. Características de las ventanas

	MARCO	VIDRIO	RENOVACIÓN DE AIRE	U	SHGC	VT
R	Aluminio	Vidrio 4 mm	Apertura/cierre automático	5,4	0,73	0,71
O	Madera LighTEK 68	Planitherm XN F2 4(16 argón)4	PremiVent Recuperación de calor. Ventilación mecánica	1,88	0,33	0,50

R Ventana de Referencia

O Ventana Optimizada

Los dos espacios disponen de una bomba de calor independiente modelo Vaillant VAI 6 de 2,3 kW, de clase energética A. (Fig. 7).

En cada uno de los espacios se miden las siguientes variables:

- 6 medidas de temperatura superficial mediante termopares.
- 1 medida de humedad relativa en el centro del espacio.
- 1 medida de calidad del aire ( $CO_2$ ) en el centro del espacio.

- 1 medida de temperatura interior en el centro del espacio.
- 3 medidas de iluminación.
- 1 medida de consumo eléctrico de una bomba de calor.
- En el exterior en fachada sur se instala una estación meteorológica (DAVIS VANTAGE PRO2).

Todos los sensores son alámbricos y están cableados a través de techos, suelos y paredes y se distribuyen hasta llegar al panel de monitorización que es el encargado de obtener la información de todos y cada uno de los sensores, almacenar la información de los sensores a una frecuencia de 10 minutos y enviarlos a un servidor de datos para que se procesen posteriormente. El panel de monitorización recibe información de los sensores y consta de los siguientes elementos:

- Sistema empotrado (TjMon).
- Módulo de adquisición de termopares (SDIN-THERM)
- Módulo de adquisición de NTC (SDIN-NTC)
- Módulo de adquisición de señales analógicas (SDIN-ANALOG) encargado de obtener las medidas de humedad,  $CO_2$  e iluminación.
- Contador eléctrico.
- Módulo de comunicación con la estación meteorológica.

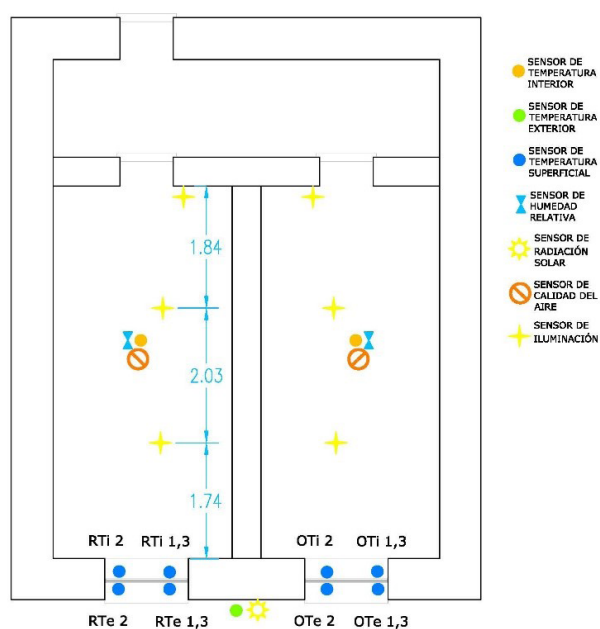


Fig. 7. Planta del Laboratorio REVEN y ubicación de los diferentes sensores en cada espacio (4).

En la Fig. 8 se observa la temperatura superficial interior y exterior de los acristalamientos. En la ventana optimizada se observan incrementos de temperatura superficial entre interior y exterior máximos de 10 °C durante el día y de en torno a 4 °C en la madrugada cuando la temperatura descende por debajo de 25 °C.

Uno de los avances importantes del Laboratorio REVEN, en la toma y el manejo de datos, es la disponibilidad de los mismos en tiempo real, a través de una página web, gracias al diseño del grupo ROBOLAB de la ETSIT de la UPM. Con un interfaz web de monitorización, que facilita el acceso a los datos obtenidos y procesados. Este acceso está abierto al público en general a través de la página web del proyecto Además de los datos procesados que se muestran en la página web, los investigadores tienen acceso a los datos instantáneos obtenidos por el sistema de monitorización.

Más información sobre el proyecto REVEN, se puede ver en la página web del proyecto de investigación <https://proyectoreven.ietcc.csic.es/index.php/proyecto/>

En relación con los equipos y los resultados del proyecto REVEN, al final del trabajo aparece una reseña bibliográfica (4) donde se indican más datos.

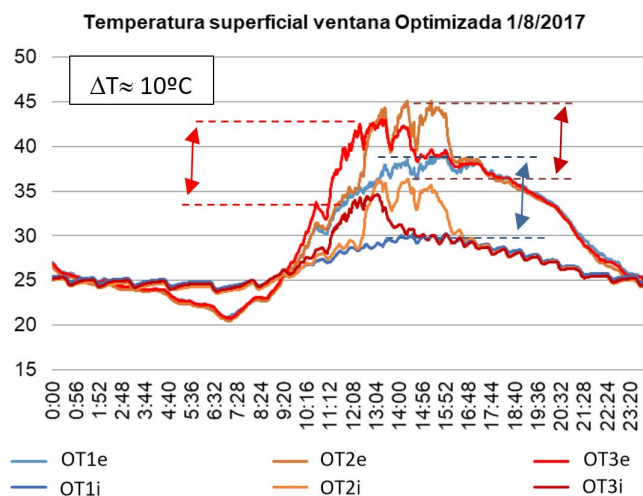


Fig. 8.- Temperatura superficial ventana Optimizada 1/8/2017. ΔT entre sensores de la cara exterior y la interior.

#### 4. RADON-Pilot BIA2004-01460 -(2005- 2007)

El isótopo del radón Rn-222, aparece en la naturaleza como producto de la desintegración natural del radio-226, común en la corteza terrestre. El potencial de exhalación de un terreno viene definido por el contenido de radio del sustrato (por ejemplo, los graníticos), y por la permeabilidad del mismo que permite la movilidad a través de los poros. El radón, como elemento gaseoso, posee una alta movilidad y puede penetrar en los edificios a través de fisuras o grietas (advección: mecanismo predominante) o a través de los materiales de la envolvente que estén en contacto con el terreno (difusión). (Fig 9).

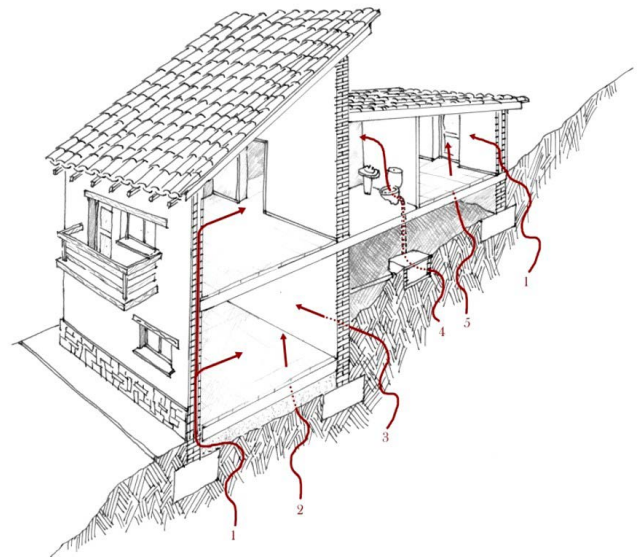


Fig. 9. Caminos predominantes de entrada de radón (B. Frutos)

La acumulación de este gas en los recintos cerrados puede elevar las concentraciones y constituir un riesgo para la salud de las personas que lo inhalen. La OMS advierte de sus efectos, situándolo como agente cancerígeno de grado uno, siendo la segunda causa de contracción de cáncer de pulmón (WHO radón Handbook 2009). Se han publicado normativas de control y protección derivadas de la Directiva Europea (DIRECTIVA 2013/59/). Una de ellas es el reciente CTE DB-HS6 “Protección frente al gas radón”, que contempla una serie de soluciones para evitar que los niveles superen el umbral límite de

300 Bq/m<sup>3</sup>. Este proyecto que se presenta constituyó una base científica-técnica para la elaboración del mismo.

**OBJETIVO:** Estudio de la efectividad de distintas soluciones de remedio frente a la entrada de radón.

- Fase 1: Estudio de los mecanismos de entrada de radón en un edificio.
- Fase 2: Estudio de la efectividad de 8 soluciones de remedio instaladas en el mismo edificio.

El proyecto contó con la construcción de un prototipo de vivienda experimental a modo de demostrador y estudio de técnicas. Se usaron técnicas y materiales habituales con la idea de reproducir las características tipológicas de una vivienda común en España. El módulo, de dos alturas, una sobre rasante y otra semienterrada, permite el estudio de la relación de concentraciones entre ambos espacios. La planta es de forma cuadrada, con 5 metros de lado, y ocupa una superficie de 25 m<sup>2</sup>. Las dos plantas están unidas mediante una escalera interior con puerta que independiza ambos espacios. La cubierta se diseñó plana y transitable para poder acceder a ella y manipular los sistemas de extracción que se instalarían en siguientes fases, ver Fig 10.

Posee un sistema de monitorización en continuo en sus dos espacios interiores. Consta de los siguientes sensores:

- 8 Sondas de Temperatura y Humedad
- 4 Sondas de presión diferencial entre varios ambientes
- 2 equipos DOSEman y 2 equipos SCOUT (SARAD). Concentración de radón en intervalos de 1 hora.

**FASE 1:** Durante 4 meses se midieron las concentraciones de radón en el módulo sin ninguna medida correctora instalada. Se hicieron estudios de correlación con las variables atmosféricas. En la Figura siguiente se muestra un ejemplo del incremento de radón debido a un descenso mantenido en las presiones atmosféricas. Otros datos de interés:

- Un descenso de 3.000 Pa en P. Atmosférica, provocó un incremento de 90.000 Bq/m<sup>3</sup> (225%)
- Aumentos de 900 Bq/m<sup>3</sup> (2,3%) por alteración del gradiente de presiones debido a vientos incidentes.
- Oscilaciones diarias por ciclos térmicos.
- Aumento de radón en el módulo por saturación de poros en el terreno circundante debido a lluvias.

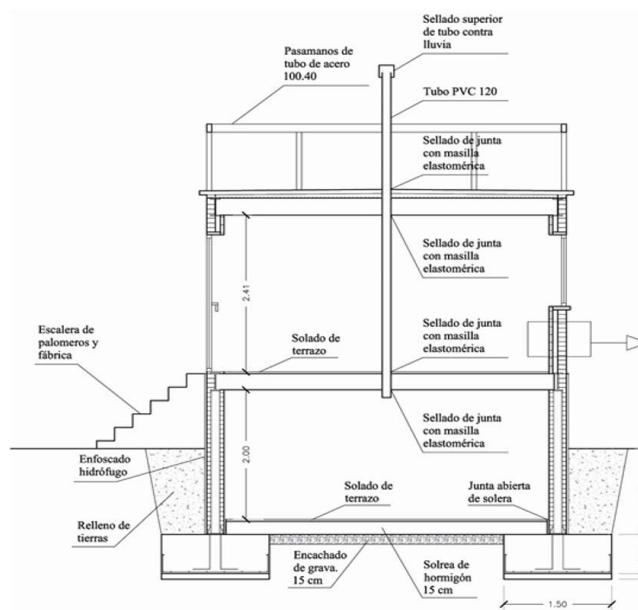


Fig. 10. Sección e imagen del módulo construido

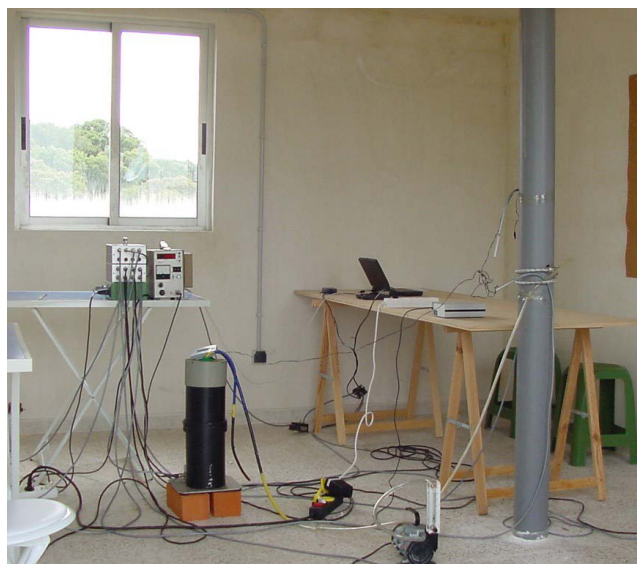


Fig. 11. Interior del módulo con los sistemas de monitorización.

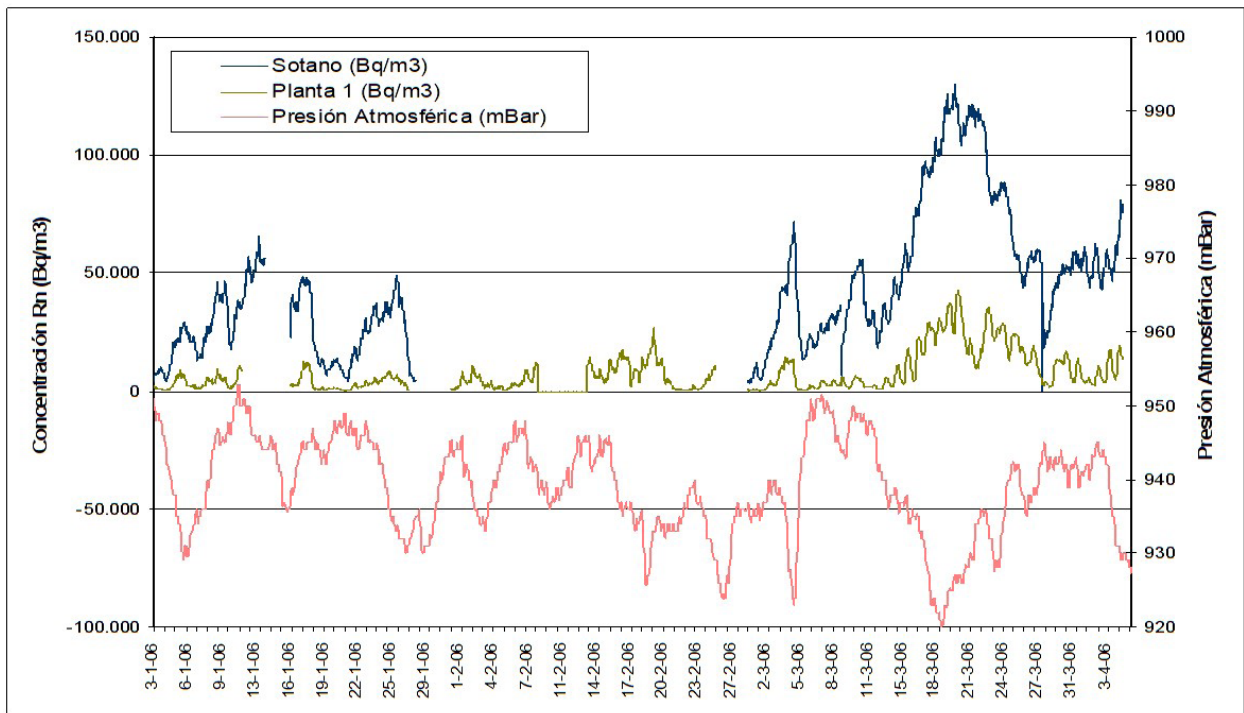


Fig. 12. Concentración de radón /P. Atm

FASE 2: Se estudiaron 8 variantes de sistemas de protección. Se ejecutaron en el módulo de forma consecutiva, y se estudiaron las concentraciones de radón en modo pasivo y activo, por periodos de 1 mes cada uno:

- 5 sistemas de despresurización de terreno con dos ubicaciones de puntos de succión distintos, y con la posibilidad de activarlos mediante un extractor.
- 1 sistema de presurización de terreno.
- 1 sistema de ventilación de forjado sanitario
- 1 sistema de barrera frente a radón.

Un ejemplo de sistema de despresurización se muestra a continuación. Se observa una reducción en las concentraciones de ambas plantas con la despresurización de terreno por arqueta central, en modo pasivo.

Este estudio se realizó con todas las medidas y se pudo obtener un cuadro de efectividades y singularidades de cada una. Ver información en la bibliografía (5, 6, 7 y 8).

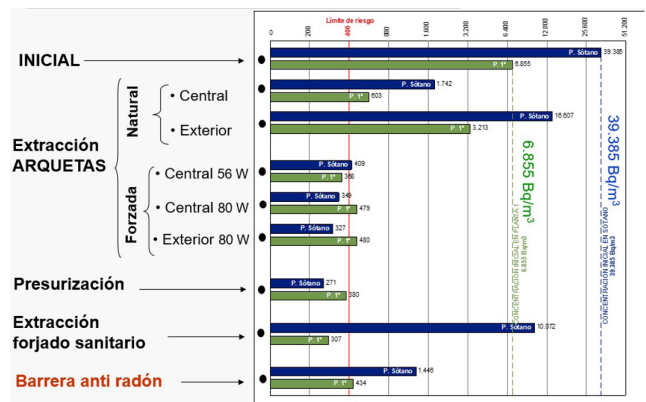
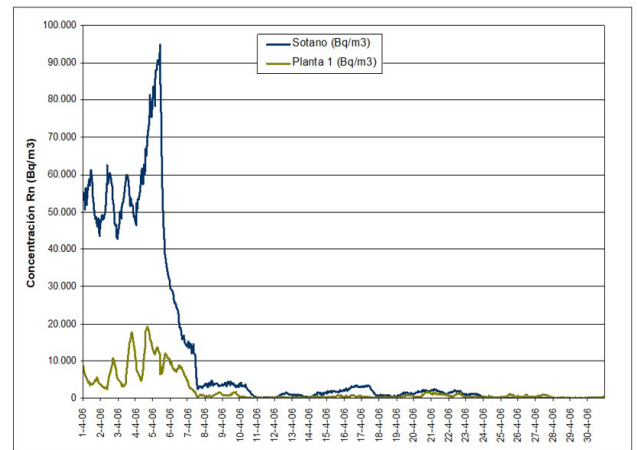
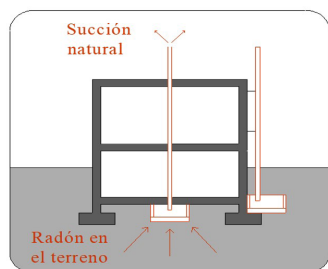


Fig. 13. Cuadro de efectividades de las soluciones

## 5. MICET.

BIA 2014-56827-R (2015-2018)

La rehabilitación energética y descarbonización del parque inmobiliario requieren del uso de materiales de última generación y la mejora de sistemas de climatización pasiva. El muro Trombe (MT) es eficiente en la reducción de cargas de calefacción. Sin embargo, en climas con veranos cálidos su absorción térmica genera sobrecalentamiento. Como parte del proyecto BIA2014-56827-R se utiliza el recubrimiento termocrómico a base de cemento (RTC) para controlar la absorción térmica del MT en temporada de refrigeración[9]. El RTC modifica sus propiedades termo ópticas cuando su temperatura supera los  $31^{\circ}\text{C}$ , pasa de un estado oscuro a claro reduciendo su absorción (Fig. 14).

En trabajos anteriores se han analizado el comportamiento y la durabilidad del RTC y se han probado elementos para evitar su foto degradación. A través de un modelo informático se ha comprobado el comportamiento de diferentes composiciones para el muro masivo y tasas de ventilación para evitar el cambio de estado oscuro en invierno [10].

El objetivo de esta nueva etapa es analizar el desempeño térmico y energético del prototipo de un MT con RTC en el muro base (MTT) mediante su monitorización bajo condiciones climáticas reales para identificar las ventajas y desventajas del sistema, sus componentes y configuraciones de uso.

El prototipo fue construido en una de las células de experimentación de la Universidad Politécnica de Madrid en el Campus de Montegancedo, (Fig. 15). El clima es mediterráneo típico, con veranos cálidos e inviernos relativamente fríos, clima D3 según el CTE. La célula donde se ha colocado el MTT es un cubo de 3,30m de altura, longitud y ancho. Los muros, piso y techo se componen de una chapa minionda, una capa de 80mm de poliestireno extruido, un tablero OSB de 16mm, una capa de 70mm de lana de vidrio con barrera de vapor, tres capas más de poliestireno extruido (dos de 120mm y una de 80mm) y un enlucido de yeso de 10mm.

El MTT abarca un área de 2160 x 2160 mm de la fachada sur del módulo, consta de un muro masivo y una ventana al exterior, la separación entre ambos es de 200 mm para conformar una cámara de aire.

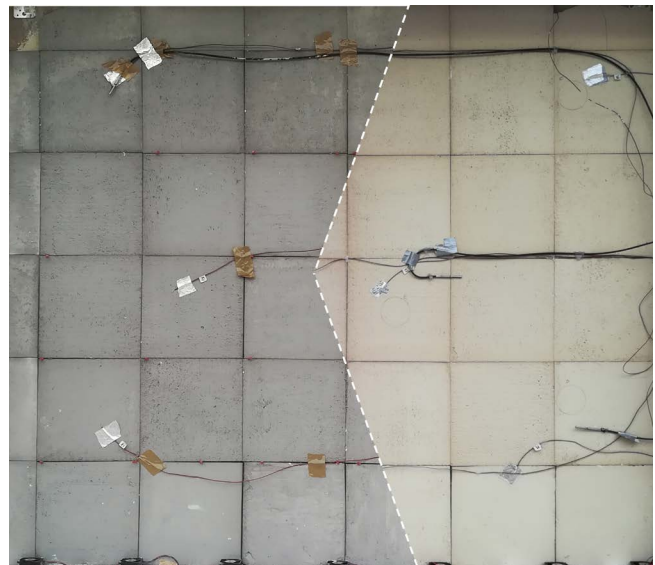


Fig. 14. Estados del MTC: oscuro ( $T_{sup} < 31^{\circ}\text{C}$ ) y claro ( $T_{sup} > 31^{\circ}\text{C}$ ).



Fig. 15. Fotografía del MTT y la célula de experimentación

El muro se compone de una capa de yeso de 10mm, una de ladrillo de hueco sencillo de 40mm, una cámara de aire no ventilada de 50mm, un muro de ladrillo perforado de 115mm y una capa de baldosas de 300 x 300mm que contienen el RTC. La ventana tiene marcos de madera pintados de blanco y vidrios dobles de 4mm de color amarillo debido a su baja transmisión en el rango de baja longitud de onda como protección para el RTC. Se ha colocado un alero de 700mm que da sombra al MTT en verano. El prototipo incluye 7 ventiladores de 12V dentro de la cámara que aportan la tasa de ventilación. A través de rejillas de 450 x 150 mm en el muro masivo y en la cámara, se han configurado dos tipos de ventilación, una para periodos fríos y otra para periodos

cálidos. En el primero, las rejillas del muro permanecen abiertas y las de la cámara cerradas, creando una circulación interior-interior, igual que un MT. En el segundo, las rejillas del muro se cierran y las de la cámara se abren, generando una circulación exterior-exterior o de fachada ventilada. El módulo cuenta además con un sistema de climatización que se puede activar para un valor de la temperatura interior.

La monitorización en tiempo real se realiza a través de 24 sensores de temperatura y 3 de velocidad del aire, ubicados en distintas zonas del MTT y conectados a través de un bus serial RS-485. 6 termopares tipo-T se colocaron sobre las baldosas de RTC, 5 dentro de la cámara no ventilada del muro, 1 sobre cada una de las caras interiores del módulo, incluyendo piso y techo y 2 más en la parte baja y alta de la cámara. Los 3 anemómetros se ubican sobre el RTC para registrar el movimiento del aire generado tanto por los ventiladores como el producido naturalmente cuando se abren las rejillas al exterior (Fig. 17). Los termopares tienen una precisión de  $0,1^\circ$  y los anemómetros de  $2,54$  mm/s. Los sensores realizan sus mediciones cada 10 ms., las cuales son promediadas y guardadas cada segundo. Cada 10 minutos, mediante un protocolo RS-485 RTU-Modbus, estos datos son recolectados por el controlador principal (TjMon), el cual los almacena en una tarjeta *Secure Digital* (SD), además de enviarlos al servidor de monitorización.

Las mediciones de los termopares ubicados sobre el RTC, determinan la activación de los ventiladores. Cuando la temperatura de las baldosas supera los  $25^\circ\text{C}$  se activa el primero, aportando un flujo de  $26.63$  ft<sup>3</sup>/min. Cada grado de aumento y hasta los  $28^\circ\text{C}$ , se activa un par de ventiladores más, hasta activarse las 7 unidades.

Actualmente se están analizando los datos obtenidos. La temperatura superficial del RTC, la temperatura interior del módulo y la velocidad del aire dentro de la cámara ventilada, serán correlacionadas con las condiciones climáticas del periodo de estudio. De esta forma se establecerán los factores ambientales de mayor impacto para la absorción térmica del RTC, la mejora de la temperatura al interior del módulo y la efectividad de la tasa de ventilación para enfriar el RTC en invierno. Los resultados de una monitorización a profundidad como la planteada, permitirán ver las cualidades y deficiencias del prototipo y calibrar el modelo computacio-

nal para evaluar su capacidad en la rehabilitación de edificios, y ponderar la experimentación del MTT en construcciones reales.

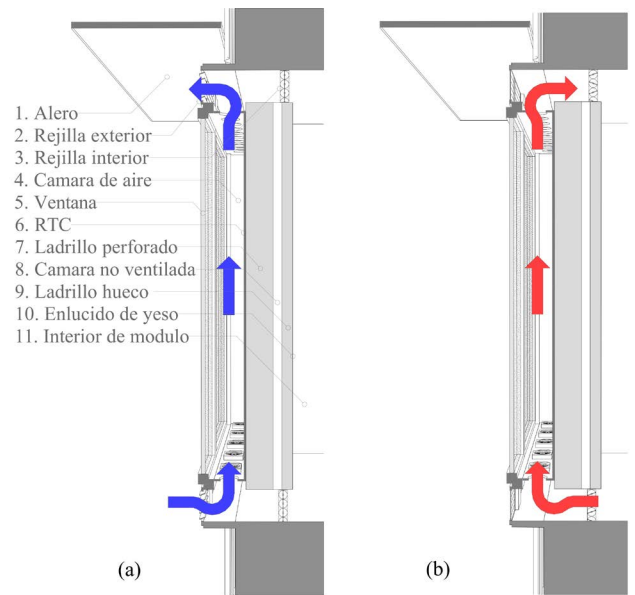


Fig. 16. Tipos de ventilación del MTT: (a) Periodo cálido y (b) frío.

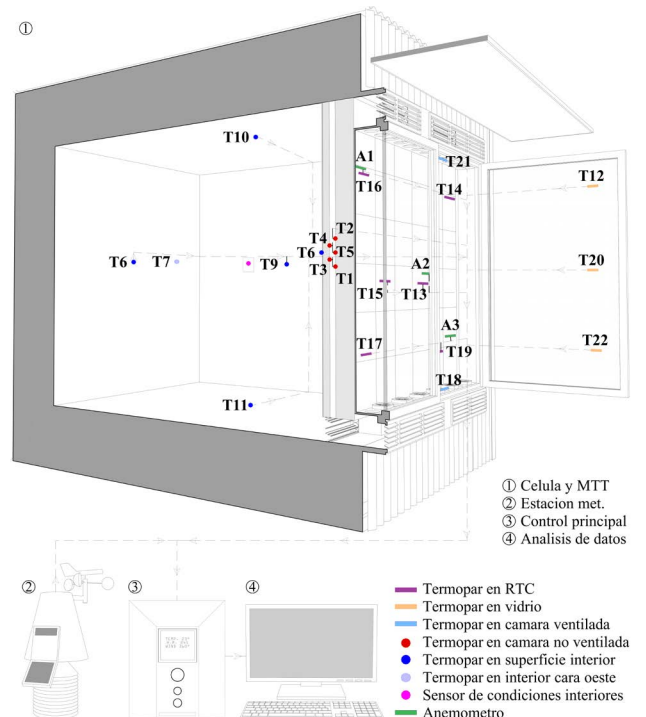


Fig. 17. Ubicación de sensores y procesamiento de datos medidos.

## Referencias de los proyectos

### REFAVIV

- (1) Alonso, I. Oteiza, J. García-Navarro, F. Martín-Consuegra. (2016) Energy consumption to cool and heat experimental modules for the energy refurbishment of façades. Three case studies in Madrid. *Energy & Building*, 126, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.04.034>
- (2) Guerrero-Rubio, J., Sendra, J., Fernández-Agüera, J., Oteiza, I. (2018). Modelos predictivos del consumo energético de climatización asociado a soluciones de fachadas en Madrid a partir de la monitorización en módulos de ensayo. *Informes de la Construcción*, 69(548), e225. doi:<http://dx.doi.org/10.3989/id.54794>
- (3) Alonso, C. (2015). Rehabilitación energética de fachadas: Propuesta metodológica para la evaluación de soluciones innovadoras, basándose en el diagnóstico de viviendas sociales construidas entre 1940 y 1980 (Tesis Doctoral). Universidad Politécnica de Madrid.

### REVEN

- (4) Arranz, B., Oteiza, I., Delgado, E., & Gutiérrez, A. (2020). Construcción y monitorización del Laboratorio REVen para el estudio del impacto de las ventanas integrando eficiencia energética y calidad ambiental interior. *Informes de la Construcción*, 72(557), e324. doi:<http://dx.doi.org/10.3989/ic.67523>

### RADON-Pilot

- (5) Frutos, B., Olaya, M., 2010. Protección frente a la inmisión de gas radón en edificios. CSN. Colección Inf. Tec. 24.2010.
- (6) Frutos, B., Olaya, M., Esteban, J.L., 2011. Sistemas de extracción como técnicas constructivas para evitar la entrada de gas radón en las viviendas. *Inf. la Construcción* 63, 23–36.
- (7) Frutos Vázquez, B., 2009. (Tesis Doctoral). Estudio experimental sobre la efectividad y la viabilidad de distintas soluciones constructivas para reducir la concentración de gas radón en edificaciones. Universidad Politécnica de Madrid.

- (8) Frutos Vázquez, B., Olaya Adan, M., Quindós Poncela, L.S., Sainz Fernández, C., Fuente Merino, I., 2011. Experimental study of effectiveness of four radon mitigation solutions, based on underground depressurization, tested in prototype housing built in a high radon area in Spain. *J. Environ. Radioact.* <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2011.02.006>

### MICET-MURO - TROMBE TERMOCRÓMICO

- [9] G. Perez, V.R. Allegro, M. Corroto, A. Pons, A. Guerrero, Smart reversible thermochromic mortar for improvement of energy efficiency in buildings, *Constr. Build. Mater.* 186 (2018) 884–891. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.246>.
- [10] F. Martín-consuegra, C. Alonso, G. Pérez, B. Frutos, A. Guerrero, I. Oteiza, Design, optimization and construction of a prototype for a thermochromic Trombe wall, *Adv. Build. Energy Res.* (2019) 1–18. <https://doi.org/10.1080/17512549.2019.1684365>.



# Análisis térmico de un edificio Earthbag en clima continental Mediterráneo

Monitorización y simulación

SEMB. UNIVERSIDAD DE LLEIDA

Ingrid Martorell (1), Lidia Rincón, Albert Castell, Marc Medrano, Cristian Solé, Ariadna Carrobé, Roger Vilà

(1) Doctora en Ingeniería Química. Profesora agregada Serra Húnter. Sustainable Energy, Machinery and Buildings (SEMB) Research Group, INSPIRES Research Centre, Universitat de Lleida, Pere de Cabrera s/n, 25001 Lleida, Spain

Persona de contacto/Corresponding author: [ingrid.martorell@udl.cat](mailto:ingrid.martorell@udl.cat) (Ingrid Martorell)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3400-8249> (I. Martorell)

## Análisis térmico de un edificio Earthbag en clima continental Mediterráneo. Monitorización y simulación

### RESUMEN

El Earthbag es una técnica de construcción sostenible, barata, confortable y respetuosa con el medioambiente. Este estudio analiza el comportamiento térmico de un Earthbag en clima Mediterráneo continental. El Earthbag, en forma de domo, tiene una superficie de 7,07m<sup>2</sup>, una puerta de vidrio al sur y dos ventanas confrontadas en las fachadas este y oeste. La monitorización se realizó en verano e invierno y se recogieron datos de temperatura y humedad del aire, temperaturas de las paredes y radiación solar horizontal. Los escenarios estudiados son: 24h de ventilación cruzada, ventilación cruzada nocturna, oscilación libre sin ventilación y temperatura interior controlada. Los resultados de monitorización y simulación son comparables. Se observan reducciones en la amplitud térmica interior con respecto a la temperatura exterior del 90% en verano y 88% en invierno. Las ganancias solares pasivas representan una reducción del consumo de calefacción del 2,3% en invierno y 8,9% en el equinoccio.

**Palabras clave:** Earthbag; confort térmico; diseño pasivo; monitorización; simulación.

## *Thermal analysis of an Earthbag building in Mediterranean continental climate*

### ABSTRACT

*Earthbag is a sustainable, low-cost, comfortable and environmentally friendly building technique. This study analyzes the thermal performance of an Earthbag building located in Mediterranean continental climate. The dome shape Earthbag dwelling has a net floor area of 7.07m<sup>2</sup>, a glass door facing south and two confronted windows in the east and west facades. The monitoring was performed under summer and winter conditions and data collection consisted in air temperature and humidity, surface wall temperatures and horizontal solar radiation. Twenty-four hours cross ventilation, night cross ventilation, no ventilation in free floating mode and a controlled indoor temperature were the scenarios tested. Monitoring and simulation comparisons show a good match. Reductions of 90% in summer and 88% in winter, in the interior thermal amplitude with respect to exterior temperatures are found. Passive solar gains made a reduction of heating energy consumption of 2.3 % in winter and 8.9% in equinox.*

**Keywords:** *Earthbag; thermal comfort; passive design; monitoring; simulation.*

## 1. Introducción

El arquitecto iraní Nader Khalili patentó y desarrolló el concepto Earthbag como una técnica de construcción de edificios que consiste en el uso de sacos rellenos de tierra en forma de domo (1). Esta forma ofrece más integridad y durabilidad que las construcciones cuadradas de adobe (2). Rincón et al. (3) demuestran que el Earthbag ofrece mejores prestaciones térmicas en climas áridos que las construcciones tradicionales de adobe.

El trabajo que presenta el grupo de investigación SEMB de la Universidad de Lleida (UdL) para el grupo de trabajo 2 (Módulos) del libro de Ponencias de la Jornada 2 Monitor-Red tiene como objetivo estudiar el comportamiento térmico y de confort de un edificio Earthbag construido en el campus Cappont de la Universidad de Lleida y la comparativa entre monitorización y simulación (Figura 1).



Figura 1. Earthbag en la universidad de Lleida.

## 2. Materiales y método

### 2.1. Características constructivas del Earthbag

El Earthbag se construyó con criterios bioclimáticos con una área de planta de  $7,02 \text{ m}^2$  (sección circular de 3 m de diámetro), 3,3 m de altura,  $29,96 \text{ m}^2$  de superficie envolvente,  $17,67 \text{ m}^3$  de volumen interior y un factor de forma de 1,7. Las paredes son de 35 cm (con un contrafuerte de 70 cm) y el techo es de 28 cm (Figura 2). Se utilizó una bolsa de polipropileno continua rellena con mezcla 1:1 de tierra local y arena (4) y se usó cal como estabilizante (aproximadamente un 10% del volumen de tierra total). El edificio se cubrió exteriormente con 4 cm de mortero de cal. El suelo está hecho de 9 cm de hormigón de cemento de cal encima de una capa de plástico. El domo cuenta con una puerta de vidrio mirando a sur ( $1,09 \text{ m}^2$ ) y dos ventanas opuestas en este ( $0,25 \text{ m}^2$ ) y oeste ( $0,06 \text{ m}^2$ ).

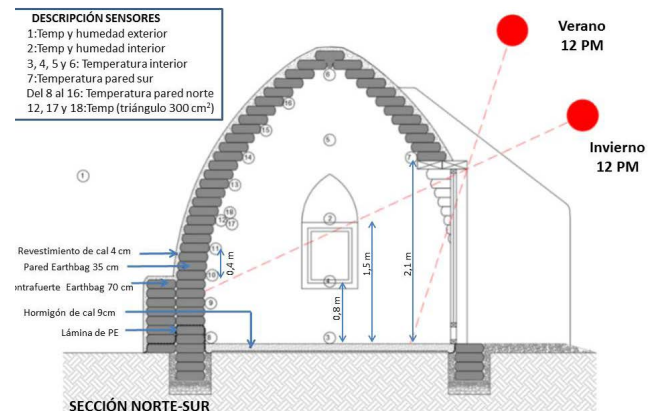


Figura 2. Sensores en el Earthbag.

### 2.2. Instrumentación

El domo fue monitorizado con 18 sensores de temperatura y 2 sensores de humedad relativa (Figura 2).

El sistema de adquisición de datos (modelo DIN DL-01-CPU) registró información cada 5 minutos. Los sensores EE210 de la casa Elektronik se utilizaron para la temperatura ambiente y la humedad ( $\pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$  para los valores de temperatura y 0,5% para los de humedad). Las temperaturas superficiales se midieron con PT-100 clase B ( $\pm 0,3 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Para los experimentos de temperatu-

ra controlada en invierno se utilizó un radiador eléctrico de 1500 W y su consumo energético se midió con Fin-der E7energy meter.

### 2.3. Cálculo de parámetros

La transmitancia térmica se calcula a partir de los datos experimentales recogidos durante una semana de niebla intensa (asumiendo estado casi-estacionario) con la ecuación [1]:

$$[1] \quad U = \frac{(T_i - T_{si})}{(T_i - T_e)} * h_{si}$$

Donde:

$T_i$ : temperatura interior del aire,

$^{\circ}\text{C}$ .  $T_{si}$ : temperatura interior superficie,

$^{\circ}\text{C}$ .  $T_e$ : temperatura exterior del aire,

$^{\circ}\text{C}$ .  $h_{si}$ : coeficiente de transferencia de calor interno

7,69 W/m<sup>2</sup>. $^{\circ}\text{C}$  (4).

La conductividad térmica de la pared del Earthbag ( $\lambda_1$ ) se calcula con la ecuación [2] y el valor  $U$  de la ecuación [1]:

$$[2] \quad U = \frac{1}{R_{si} + \frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{e_2}{\lambda_2} + R_{se}}$$

Donde:

$R_{si}$ : resistencia térmica de las superficie interior para fachada vertical, 0,13 m<sup>2</sup>. $^{\circ}\text{C}/\text{W}$  (5),

$R_{se}$ : resistencia térmica de la superficie exterior fachada vertical 0,04 m<sup>2</sup>. $^{\circ}\text{C}/\text{W}$  (5),

$e_1$ : grosor de la pared Earthbag, m,

$e_2$ : grosor del revestimiento de cal, m,

$\lambda_1$ : conductividad térmica de la pared Earthbag, W/m<sup>2</sup>. $^{\circ}\text{C}$ , y

$\lambda_2$ : conductividad térmica del revestimiento de cal, W/m<sup>2</sup>. $^{\circ}\text{C}$ .

El thermal lag ( $\Phi$ ) representa el tiempo que transcurre entre el valor máximo de la temperatura del aire interior y el valor máximo del exterior. El *decrement* factor ( $\mu$ ) es la reducción del rango de temperatura entre las dos medidas.

$$[3] \quad \Phi = 1,38 * l * \sqrt{1/\alpha}$$

$$[4] \quad \mu = \exp(-0,362 * l * \sqrt{1/\alpha})$$

Donde:

$l$  es el grosor, m y

$\alpha$  la difusividad del material, m<sup>2</sup>/s.

### 2.4. Campaña experimental

La campaña experimental se realizó desde el mes de junio de 2017 hasta el mes de julio de 2018. Los experimentos realizados se diseñaron para:

- Calcular los parámetros térmicos teóricos del Earthbag.
- Demostrar la elevada inercia térmica del edificio Earthbag: experimentos en oscilación libre sin ventilación en diciembre 2017, marzo 2018 y junio 2018.
- Estudiar los efectos de las estrategias pasivas en condiciones de verano: 24 h ventilación cruzada y ventilación cruzada nocturna en junio y julio de 2018, respectivamente.
- Estudiar el comportamiento térmico del edificio Earthbag en situación de temperatura controlada en invierno (fijada a 22  $^{\circ}\text{C}$ ) para determinar si es necesario un sistema de calefacción activo: febrero/marzo 2018.
- Estudiar el confort térmico en el edificio Earthbag durante el verano 2018 y demostrar su aplicabilidad en climas calurosos.

### 2.2. Simulación numérica

Se diseñó un modelo numérico del Earthbag con Energy Plus usando Open Studio como interface. Se utilizó el algoritmo de balance energético basado en CTF y un tiempo de paso de 6 por hora. En las simulaciones se utilizaron las siguientes consideraciones: (1) Se incorporaron los datos de radiación solar de una estación meteorológica próxima (Raïmat) al fichero climático de EnergyPlus para Lleida, (2) en los experimentos sin ventilación y después de un análisis de calibración se tomaron un valor de ACH de 0,5. En cambio, se consideraron 10 ACH cuando hay ventilación, (3) debido a la imposibilidad de dibujar la forma de domo con Open Studio, se utilizó una forma poligonal con un volumen interno un 2% superior al real, (4) se consideró un grosor de cubierta constante e igual a la media de las anchuras del domo real, (5) la simulación en EnergyPlus da la radiación solar total en los vidrios pero con Sketchup's Shadow se evaluó la radiación por m<sup>2</sup> que entraba en cada vidrio y el tiempo total de radiación solar por vidrio. Por último (6) no se consideraron cargas térmicas internas por ocupación o equipos eléctricos o electrónicos, simulando un edificio vacío.

### 3. Resultados y discusión

#### 3.1. Evaluación de parámetros térmicos

La Figura 3 muestra los resultados experimentales para la temperatura del aire en el exterior y el interior del domo. También se presenta la temperatura interior de la pared norte monitorizada (temperatura media de los sensores 12, 17 y 18, situados en forma triangular). Además la Figura muestra los valores de U calculados a partir de la ecuación [1].

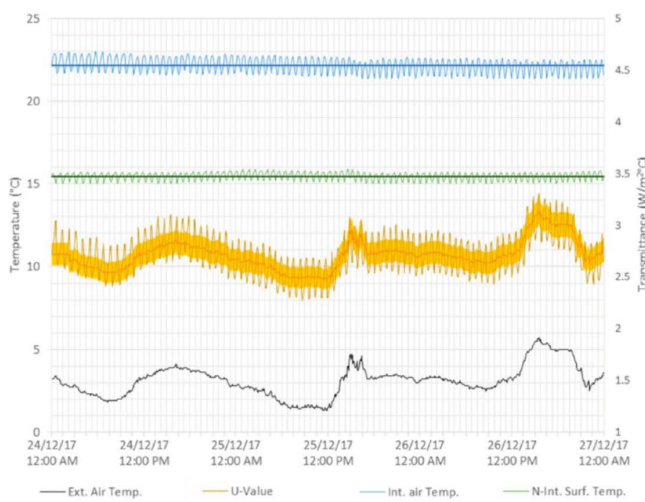


Figura 3. Temperaturas interiores y exteriores y el valor U calculado para la pared Earthbag. Datos de la monitorización experimental.

La Tabla 1 presenta los parámetros teóricos de la pared Earthbag a partir de las ecuaciones [2], [3] y [4].

Tabla 1. Parámetros térmicos teóricos

Difusividad del material, $\alpha$	0,00355 m <sup>2</sup> /h
Decrement factor, $\mu$	0,1194
Thermal lag, $\Phi$	8,1 h
Transmitancia térmica, U	2,7 W/m <sup>2</sup> ·°C

A partir del valor teórico de U y la ecuación [2] se calcula la conductividad térmica del material Earthbag de 2,18 W/m·K.

#### 3.2. Experimentos en oscilación libre

##### Inercia térmica

Se comparan resultados experimentales y de simulación para el solsticio de invierno (11-20 diciembre 2017), el equinoccio (15-23 marzo 2018) y el solsticio de verano (14-21 junio 2018) (4). El *thermal lag* en los tres periodos está entre 6 y 9 h, acorde con el valor teórico calculado en la Tabla 1. Lo mismo pasa con el *decrement factor*, con valores entre 0,1 y 0,19. La amplitud térmica media está entre 1,2 y 2,5 °C. Estos valores confirman la elevada inercia térmica de los edificios Earthbag.

##### Estrategias pasivas: condiciones de verano

Se realizan dos experimentos: (1) 24 h de ventilación cruzada (Figura 4) y (2) ventilación cruzada nocturna (Figura 5). Los datos monitorizados y simulados muestran la misma tendencia en los dos experimentos, validando la simulación.

Los resultados presentados para 24 h de ventilación cruzada durante una semana de junio de 2018 muestran un *thermal lag* inferior a 1 h y, a pesar de la ventilación, aún puede observarse un *decrement factor*. La amplitud térmica media exterior es de 10 °C mientras que la interior es de 4 °C. Además durante el mediodía la temperatura interior casi se iguala con la exterior y cuando hay bajadas de temperatura exterior drásticas el edificio mantiene temperaturas más altas que las externas. El efecto de la alta inercia térmica del edificio Earthbag es visible el 6 de junio (un día más fresco que los anteriores) cuando las temperaturas máximas interiores se mantienen unos 2 °C por encima de las exteriores. Así pues, esta estrategia no es efectiva para refrigerar el Earthbag.

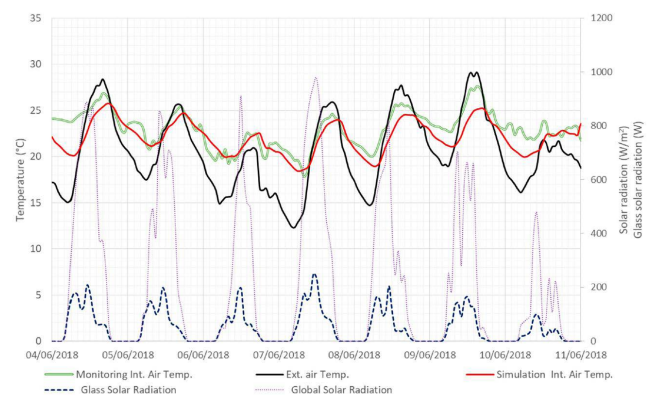


Figura 4. Temperaturas interiores monitorizadas y simuladas, temperatura exterior y radiación solar en el escenario 24 h de ventilación cruzada.

En el caso de ventilación cruzada nocturna (ventanas abiertas de 20 h a 8 h) se muestran resultados para una semana de julio de 2018 (Figura 5). El thermal lag también es de 1 h y el decrement factor de 0,4. Durante el día, las ganancias solares a través de los cristales provocan picos de temperatura pequeños en la mañana, mediodía y tarde. La ventilación nocturna causa una disminución de 5,5 °C entre las temperaturas máxima y mínima. El efecto de la obertura de ventanas se observa claramente en los días 26, 27 y 28 de julio cuando las temperaturas exteriores e interiores se igualan rápidamente. Así pues, esta es una estrategia pasiva efectiva.

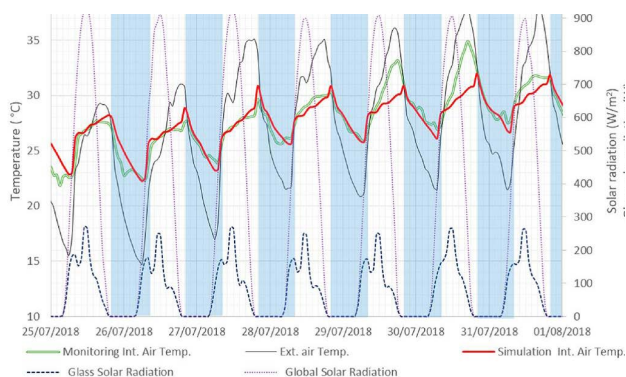


Figura 5. Temperaturas interiores monitorizadas y simuladas, temperatura exterior y radiación solar en el escenario de ventilación cruzada nocturna.

### 3.3. Experimentos con temperatura controlada

Experimentos de oscilación libre en invierno demostraron que las temperaturas interiores en invierno están por debajo de los límites de confort (4). Por lo tanto, para llegar al confort térmico o bien se aumenta la superficie de vidrio de la fachada sur o bien se aumenta la carga térmica interna. En esta última dirección se realizan experimentos fijando la temperatura interior a 22 °C, con la ayuda de un radiador eléctrico.

La Figura 6 muestra la temperatura exterior y la potencia por metro cuadrado consumida por el radiador, manteniendo la temperatura interior a 22 °C durante el periodo entre el 25 de febrero y el 5 de marzo de 2018. De nuevo, el comportamiento de los puntos monitorizados y simulados es similar. La oscilación mostrada por la potencia del radiador monitorizada es debida al sistema de control. La potencia media consumida es de

56,56 W/m<sup>2</sup> con un consumo máximo de 90 W/m<sup>2</sup> durante los días más fríos con temperaturas por debajo de 0 °C.

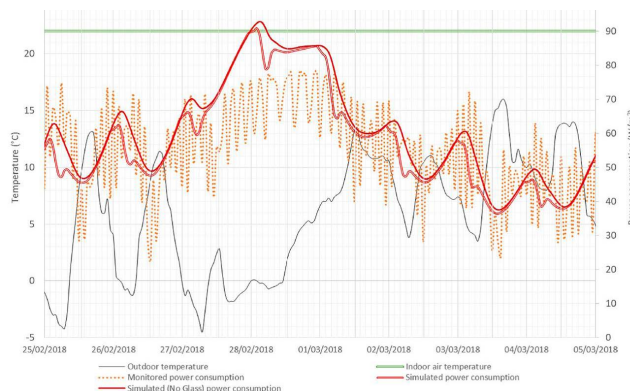


Figura 6. Potencia consumida monitorizada y simulada por el radiador eléctrico y temperaturas interna y externa en el escenario de temperatura controlada.

### 3.4. Confort térmico

Para determinar el confort térmico del Earthbag se aplica el Standard 55 Adaptive Comfort model (6) de ASHRAE a los datos experimentales de la semana de solsticio de verano. La Figura 7 muestra la temperatura operativa interna del Earthbag en función de la temperatura exterior y también los valores simulados. De la Figura se observa que la mayoría de puntos están dentro del rango de confort adaptativo o un poco por encima del límite superior (0,5-3 °C) o un poco por debajo (0,5 °C). Estos resultados son coherentes con los presentados en (6) y demuestran el buen rendimiento del edificio para conseguir confort térmico en climas calurosos.

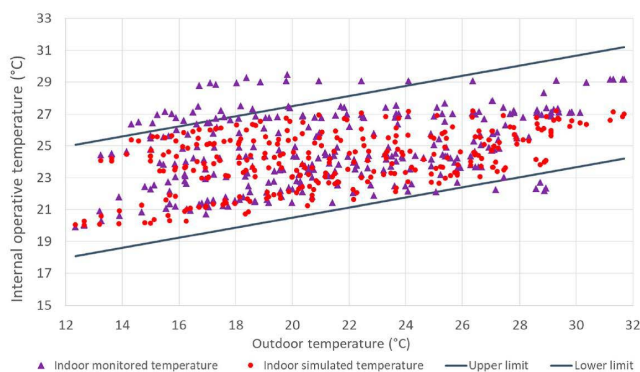


Figura 7. Confort térmico del prototipo en verano siguiendo el modelo adaptativo 55 ASHRAE

## Conclusiones

La transmitancia térmica ( $U$ ) de la pared Earthbag evaluada en este estudio es de  $2,7 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ . No se han encontrado referencias de transmitancias térmicas de Earthbag en la literatura pero cuando se compara con valores de transmitancia térmica de una pared de 30 cm de tierra prensada (*rammed earth*) se observan valores de  $U$  más bajos, entre  $1,3$  (7) y  $1,9 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  (1).

La conductividad térmica ( $\lambda$ ) de la pared Earthbag de 35 cm evaluada es de  $2,18 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ . Este valor está en la parte alta de los valores bibliográficos para tierra prensada:  $1,1 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  con densidades de  $1900 \text{ kg/m}^3$  (8) a  $1,2 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  con densidades de  $2000 \text{ kg/m}^3$  (9)

Este estudio demuestra la alta inercia térmica de una pared Earthbag con valores de *thermal lag* para los tres periodos estudiados entre 6 y 9 h, similares al valor teórico (Tabla 1) y valores de *decrement factor* entre 0,1 y 0,19, también en el rango del cálculo teórico. Además la inercia térmica produjo reducciones del 90 % en verano y del 88% en invierno de la amplitud térmica interior con respecto a las temperaturas exteriores.

Una de las estrategias bioclimáticas más utilizadas en condiciones de verano es la ventilación natural cruzada. Este estudio demuestra que el escenario de 24 h de ventilación cruzada no es efectivo. En cambio, la ventilación cruzada nocturna sí lo es porque aprovecha las temperaturas frescas de la noche para disminuir la temperatura media del edificio Earthbag. La ventilación nocturna enfatiza el efecto positivo de la inercia térmica de las paredes Earthbag que almacenan energía en las paredes durante el día y la descargan durante la noche al exterior, reduciendo la temperatura interior.

A pesar del diseño bioclimático del Earthbag y de las estrategias pasivas, el domo requiere un sistema de calefacción en invierno para llegar a condiciones de confort. Para el edificio de este estudio, para llegar a una temperatura de  $22 \text{ }^\circ\text{C}$  se necesita un consumo de energía en el rango  $1-1,7 \text{ kW}\cdot\text{h/m}^2$  por día.

## Bibliografía

- (1) Khalili N., P. V. (1998). Earth Architecture and Ceramics. California, USA: Calearth.
- (2) Sargentis F. et al. (2009) Conference earth building EarthBag Sim.pdf.
- (3) Rincón L.; Carrobé A.; Martorell, I.; Medrano M. (2019) Improving thermal comfort of earthen dwellings in sub-Saharan Africa with passive design. Journal of Building Engineering 24, 100732.
- (4) Rincón L; Carrobé A; Medrano M., Solé C., Castell A. Martorell I. (2020) Analysis of the Thermal Behavior of an Earthbag Building in Mediterranean Continental Climate: Monitorind and simulation, Energies, 13, 162, doi:10.3390/3n13010162.
- (5) Catálogo de elementos constructivos del Código Técnico de la Edificación. Instituto Eduardo Torroja de ciencias de la construcción con la colaboración de CEPCO y AICIA. (2010).
- (6) ANSI/ASHRAE Standard 55.2013, (2013) Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy
- (7) Birkhauser, GM, (2012) Building with Earth: Design and Technology of a Sustainable Architecture, Walter de Gruyter: Berlim, Alemanha, ISBN 978-3-0346-0872-5.
- (8) ISO 6946:2017 (accessed on 14 Dec 2019) Available online: <http://www.iso.org/cms/render/live/en/sites/isoorg/contents/data/standard/06/57/65708.html>
- (9) Heathcote, K (2011) El comportamiento térmico de los edificios de tierra. Inf. Constr, 63, 117-126.



# Celdas de ensayo como herramienta de rehabilitación energética de fachadas

La experiencia en Andalucía

TEP 130. UNIVERSIDAD DE SEVILLA (US)

**A. Alonso(1), R. Suárez (2), A.L. León-Rodríguez (3), C.M. Calama-González (4), R. Escandón (5)**

(1) Dra. Arquitecto. IUACC, E.T,S, de Arquitectura, Universidad de Sevilla, Sevilla (España)

(2) Dr. Arquitecto. Profesor titular. IUACC, E.T,S, de Arquitectura, Universidad de Sevilla, Sevilla (España)

(3) Dr. Arquitecto. Profesor titular. IUACC, E.T,S, de Arquitectura, Universidad de Sevilla, Sevilla (España)

(4) Arquitecto. IUACC, E.T,S, de Arquitectura, Universidad de Sevilla, Sevilla (España)

(5) Dra. Arquitecto. IUACC, E.T,S, de Arquitectura, Universidad de Sevilla, Sevilla (España)

Persona de contacto/Corresponding author: rsuarez@us.es (R. Suárez)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0321-1730> (A. Alonso); <http://orcid.org/0000-0001-6136-1596> (R. Suárez); <http://orcid.org/0000-0003-3466-7850> (A.L. León-Rodríguez); <http://orcid.org/0000-0002-6511-2885> (C.M. Calama-González); <http://orcid.org/0000-0003-0531-698X> (R. Escandón);

## Celdas de ensayo como herramienta de rehabilitación energética de fachadas

### RESUMEN

Un porcentaje significativo del parque residencial de nuestras ciudades fue construido en un contexto carente de normativas reguladoras desde el punto de vista energético. En consecuencia, los sistemas constructivos utilizados, lejos de cumplir las exigencias de eficiencia energética actuales, requieren una actuación de mejora de sus prestaciones térmicas que redunde en una mejora de las condiciones de habitabilidad y disminuyan el consumo de energía. Entre las metodologías existentes para evaluar la idoneidad de propuestas de intervención en fachadas cabe destacar el uso de celdas de ensayo, que posibilita caracterizar los flujos de energía y las condiciones ambientales internas en condiciones climáticas reales y en un ambiente interior controlado. El grupo TEP130 de la Universidad de Sevilla dispone un equipamiento de cuatro celdas, agrupadas en dos módulos con sendas parejas de celdas orientadas a sur y norte. Un módulo dispone de fachadas en su estado original y el otro la misma solución pero rehabilitada, lo que permite llevar a cabo un estudio comparativo simultáneo entre el comportamiento energético de ambas soluciones.

**Palabras clave:** celdas de ensayo; rehabilitación energética; monitorización; confort ambiental; SATE, fachada doble piel.

## *Test cells as a tool for energy retrofit of facades*

### ABSTRACT

*A significant percentage of the residential stock in our cities was built in a context lacking of regulatory standards from the energy point of view. Consequently, the construction systems used, far from meeting the energy current efficiency requirements, require the development of passive retrofit strategies that improve comfort conditions and decrease energy consumption. Among the existing methodologies to evaluate the suitability of proposals for intervention on facades, it should be highlighted the use of test cells, which make it possible to accurately characterize energy flows and internal environmental conditions in real climatic conditions and in a controlled indoor environment. The TEP130 research group at the University of Seville has four cells, grouped into two modules with two pairs of cells facing south and north. One module has facades in their original state and the other module has the same solution but retrofitted, making possible the development of a simultaneous comparative study between the energy performance of both solutions.*

**Keywords:** *test cells; energy retrofit; monitoring; environmental comfort.*

## 1. Introducción

En España cerca de un 40 % del parque residencial plurifamiliar posee más de 50 años de antigüedad, habiendo sido construidos en una época en la que las normativas existentes sobre confort ambiental y ahorro de energía determinaban unos requisitos más laxos. Lejos de cumplir las exigencias de eficiencia energética establecidas en las directivas europeas actuales, el envejecimiento del parque edificatorio y la situación de pobreza energética de la vivienda social en España pone de manifiesto la necesidad de llevar a cabo intervenciones de rehabilitación energética que mejoren el comportamiento térmico de la envolvente.

La propuesta de estrategias pasivas en edificaciones existentes es una de las principales medidas utilizadas para hacer frente al confirmado cambio climático, reducir el impacto ambiental, así como mejorar la eficiencia energética, tal y como ha sido corroborado en diversas investigaciones llevadas a cabo por la comunidad científica (1). Además, este tipo de soluciones sostenibles derivan en la mejora de las condiciones de confort del usuario (2).

La evaluación energética del parque residencial se ha enfocado principalmente mediante una fase de diseño del edificio, a través del empleo de herramientas de simulación energética, que presentan el problema de incertidumbre de los modelos, junto con la significativa influencia de los patrones de uso de los ocupantes (3). Esta evaluación debería ser comprobada en una fase operacional en condiciones dinámicas exteriores. En este escenario el empleo de celdas de ensayo, con un amplio equipamiento de monitorización y sin la influencia del usuario, permite evaluar cuantitativamente la idoneidad de las propuestas de intervención en envolventes (4).

Una de las líneas de investigación prioritarias del grupo TEP 130 “Arquitectura, Patrimonio y Sostenibilidad: Acústica, Iluminación y Energía” (5) de la Universidad de Sevilla se centra en la rehabilitación energética en edificios existentes mediante la monitorización de variables ambientales y la propuesta de estrategias de intervención de carácter pasivo.

En esta línea el grupo de investigación posee una dotación de dos celdas dobles de ensayo gracias al pro-

yecto autonómico CELDA “Rehabilitación energética y ambiental de viviendas sociales en Andalucía: evaluación con celdas de ensayos” (2015) (G-GI3003/IDIR), financiado por la Consejería de Fomento y Vivienda y la Agencia de Obra Pública de la Junta de Andalucía con fondos FEDER, cuya finalidad es la evaluación de soluciones constructivas de envolventes verticales destinadas a la rehabilitación de viviendas sociales, mediante la utilización de módulos con celdas experimentales que permiten obtener información de variables ambientales, energéticas y físico-constructivas en función de la orientación y solución constructiva utilizada.

Esta investigación ha tenido su continuidad con el proyecto del Plan Estatal I+D+I “Retos de la sociedad” denominado MeDoS “Optimización paramétrica de fachadas de doble piel en clima Mediterráneo para la mejora de la eficiencia energética ante escenarios de cambio climático (2018-2020) (BIA2017-86383-R), financiado por el Ministerio Economía, Industria y Competitividad y Fondos FEDER. Este proyecto tiene como objetivo optimizar el diseño de Fachadas de Doble Piel (DSF) en la rehabilitación de edificios residenciales en clima mediterráneo mediante métodos numéricos y experimentales para la mejora de la eficiencia energética y el confort interior.

El principal objetivo de este trabajo es exponer el equipamiento de celdas de ensayo y la metodología de monitorización aplicada por el grupo de investigación TEP-130, como medio de caracterización energética y de evaluación de soluciones de rehabilitación de envolventes verticales del parque residencial para la mejora de las variables energéticas, ambientales y de calidad del medioambiente interior.

## 2. Descripción de las celdas

Las celdas de ensayo, construidas en 2015 en Sevilla (zona climática B4), se disponen en dos módulos independientes. Cada módulo está configurado por dos celdas orientadas al norte y al sur, respectivamente, y separadas por una cámara neutra en la que se disponen los sistemas de control, equipamiento de medidas y sistema de climatización (6). Cada par de celdas, cuya distribución en planta se observa en la Figura 1, dispo-

ne de un mismo tipo de fachada a ensayar, siendo en un módulo la fachada en su estado original y en el otro módulo la fachada con la solución rehabilitada (SATE o fachada de doble piel). El interior de cada celda reproduce un espacio habitacional con unas dimensiones de 2.40 m de ancho, 3.20 m de largo y 2.70 m de altura.

### 2.1. Caracterización constructiva

La caracterización constructiva de la envolvente térmica cuasiadiabática (cerramientos este y oeste, suelo y cubierta), está formada por un sistema de dos paneles sándwich de alta densidad, uno de 100 mm hacia el interior y otro de 200 mm hacia el exterior, con una capa de aislamiento de lana mineral (LM) de 100 Kg/m<sup>3</sup> de espesor 80+80 mm entre ambos paneles, con un valor de transmitancia térmica  $U = 0.05 \text{ W/ m}^2\cdot\text{K}$ .

El cerramiento norte y sur de las celdas es configurable mediante las distintas opciones de fachada a ensayar, ejecutadas sobre un marco metálico. La sección constructiva de las tres soluciones, definidas a continuación, se representa en la Figura 2:

- Fachada base (F1). Fachada estadísticamente más habitual en las viviendas sociales de Andalucía en el periodo 1950-1980.  $U = 1.43 \text{ W/ m}^2\cdot\text{K}$
- Fachada SATE (F2). Propuesta de mejora de la fachada base (F1) con la disposición de aislamiento térmico exterior.  $U = 0.47 \text{ W/ m}^2\cdot\text{K}$
- Fachada de doble piel (F3). Propuesta de mejora de la fachada base (F1) con la incorporación de una solución de fachada ventiladas.  $U = 0.42 \text{ W/ m}^2\cdot\text{K}$

La solución de fachada de las celdas orientadas al sur dispone de una ventana de aluminio con doble acristalamiento 4+8+4 ( $U = 3.3 \text{ W/ m}^2\cdot\text{K}$ ) de dimensiones 116x108 cm con persiana de lamas de PVC, siendo las fachadas opacas en la orientación norte. En la Figura 3 se muestra la apariencia externa final de los módulos, con la solución de fachada F1 en el módulo 2 y F2 en el módulo 1.

### 2.2. Sistema de ventilación y climatización.

Para poder simular el sistema de ventilación de una vivienda se dota a cada una de las celdas de un sistema de ventilación mecánica controlado mediante un extractor en línea y entrada de aire exterior gobernada por una compuerta motorizada.

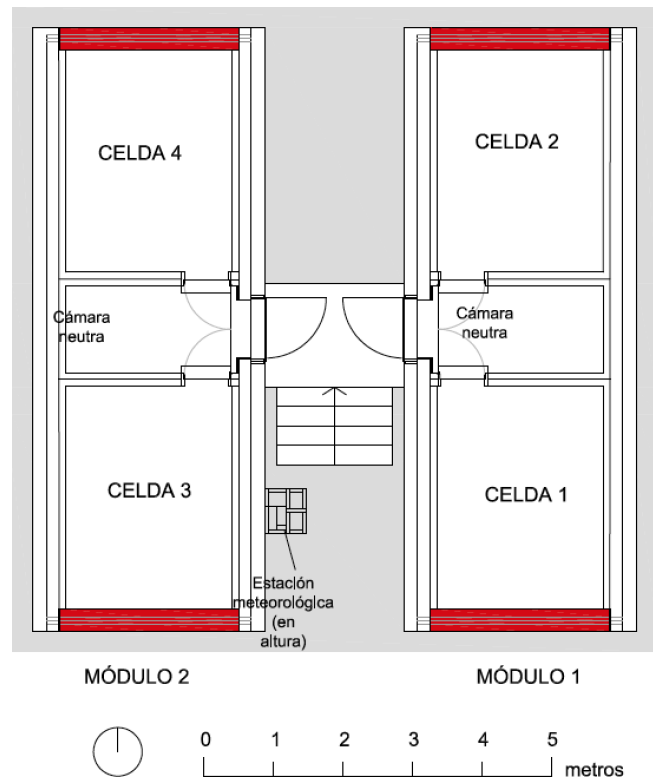


Figura 1. Planta distribución módulos y celdas.

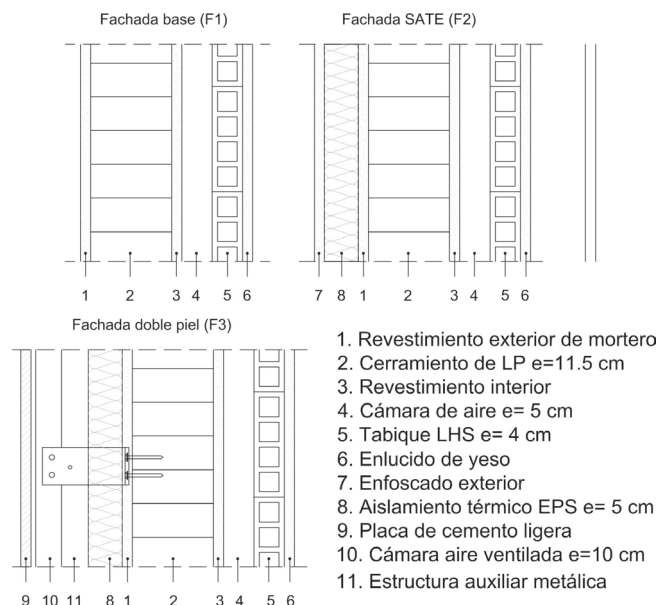


Figura 2. Caracterización constructiva de la envolvente: fachada base (F1) y dos opciones de fachada rehabilitada: SATE (F2) y doble piel (F3).

Además, cada módulo tiene un sistema de control térmico interior formado por una bomba de calor reversible (aire-agua) y tres fancoils: uno por cada celda y un tercero para la cámara neutra. El sistema incluye también un depósito de inercia de 200 litros de capacidad. Las potencias térmicas (frío/calor) de los equipos son: equipo de producción 5/5.5 kW, fancoils de cada celda 2.5/3.5 kW y fancoil de la cámara neutra 1.87/2.53 kW. Este sistema hidráulico permite medir tanto la demanda térmica de cada celda como el consumo final de energía.



Figura 3. Fachada sur de los módulos 1 y 2.

### 3. Sistema y protocolos de monitorización

El empleo de celdas de ensayo pareadas permite evaluar las prestaciones energéticas de soluciones de fachada mediante la monitorización in situ de diferentes variables ambientales además de caracterizar los flujos de energía y las condiciones ambientales en condiciones climáticas reales y en un ambiente interior controlado.

#### 3.1. Sistema de monitorización. Tratamiento de datos

El sistema de monitorización permite controlar las siguientes variables ambientales y energéticas mediante una instalación de sondas y sensores, (Tablas 1 y 2, Figura 6):

- Condiciones ambientales exteriores. Una estación meteorológica controla las variables de temperatura del aire, humedad relativa, concentraciones de

CO<sub>2</sub>, velocidad y dirección del viento, irradiación solar normal directa, difusa e iluminancia.

- Calidad ambiental interior. En cada una de las celdas existe un control de temperatura interior, humedad relativa, iluminancia natural interior y concentraciones de CO<sub>2</sub>.
- Eficiencia energética. Las instalaciones de climatización están equipadas con sensores de potencia consumida, intensidad eléctrica, voltaje, velocidad y temperatura del aire en los conductos de ventilación, temperatura del agua en la red de ida y retorno de la bomba de calor y caudalímetros en las unidades interiores de climatización.

El sistema de medición dispuesto está organizado a su vez en siete subsistemas: cuatro subsistemas iguales entre sí para las celdas de ensayo cuyos datos son controlados y almacenados por el *data logger* con una resolución mínima de 1 ms y una precisión de  $\pm 3$  min al año, modelo Campbell Scientific CR1000X y AM16/32B Multiplexor 2/4 hilos con 32 canales, dispositivos que permiten la consulta y lectura de forma remota y en tiempo real de las medidas, el registro de todos los elementos de campo así como la configuración de las señales; dos subsistemas iguales entre sí para los sistemas de climatización de cada módulo; y un subsistema para controlar las condiciones exteriores, siendo este último integrado en una estación meteorológica local que se localiza en la cubierta. En la Figura 4 se muestra el interior de la cámara neutra, pudiéndose observar los distintos sistemas dispuestos.

Cabe señalar que el proceso de monitorización se establece en dos fases temporales: en la primera de ellas se han caracterizado las fachadas base (F1) y rehabilitada con SATE (F2) y se controlan todas las variables reflejadas en las Tabla 1 y 2, a excepción de aquellas referentes a parámetros medidos en la superficie exterior o en la cámara de aire de la fachada de doble piel (F3), cuya medición pertenece a una segunda fase que está en desarrollo.

La información de las variables monitorizadas por los dispositivos instalados se envía periódicamente a los *data loggers*, donde se almacena para posteriormente ser volcada a un servidor de tipo FPT (File Transfer Protocol) cada 30 minutos. Los datos pueden ser consultados a través de un portal en formato html y se transmiten

a los equipos locales, los cuales se encuentran conectados a sistemas de alimentación ininterumpida (SAI) que evitan la pérdida de datos en caso de cese de energía eléctrica. La configuración de las sondas y concentradores instalados pueden ser modificados de forma remota. Para la instalación del sistema se ha seguido lo dispuesto en el protocolo indicado por la norma UNE-EN ISO 7726:2002 considerando para la lectura de los valores monitorizados, un intervalo de 5 minutos.

### 3.2. Pruebas de verificación y control

Previo a la puesta en funcionamiento de las celdas se realizaron ensayos y pruebas para garantizar las adecuadas condiciones ambientales de los recintos: test de infiltraciones y estudio termográfico.

Para garantizar las adecuadas condiciones de estanqueidad de las celdas se realizaron ensayos de presurización/despresurización mediante un equipo Blower

Door siguiendo el protocolo establecido en la norma UNE EN 13829. En la Figura 5 se muestra una imagen tomada durante la realización del ensayo Blower Door. En este proceso se han ido sellando las juntas tras el proceso constructivo hasta garantizar unas adecuadas condiciones de estanqueidad similares a las existentes en viviendas sociales andaluzas (7).

Asimismo, para visualizar el flujo de calor en los cerramientos y la presencia de puentes térmicos se tomaron imágenes infrarrojas. En la Figura 7 se observan las imágenes infrarrojas y visuales de las celdas en orientación sur. El equipamiento utilizado fue una cámara infrarroja FLIR T620bx, un psicrómetro FLIR MR77 para la medida simultánea de temperatura y humedad relativa del aire y un láser distance measure LEICA DistoTM D5 para tener en cuenta la atenuación atmosférica de la radiación con la distancia. Las mediciones se realizaron siguiendo el procedimiento indicado en las normas EN 13187 e ISO 18434-1.



Figura 4. Localización de los sistemas de control, equipamiento de medidas y sistema de climatización en la cámara neutra.



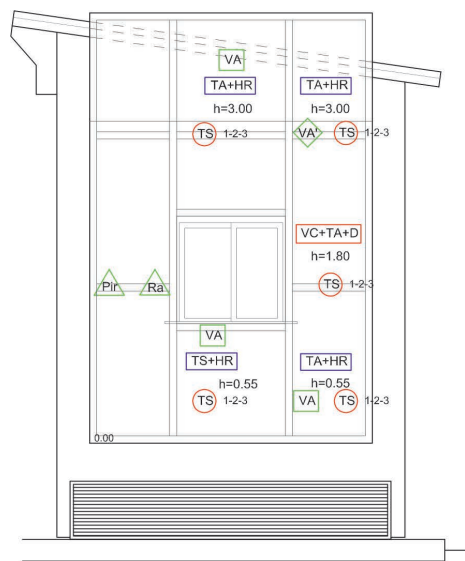
Figura 5. Realización del ensayo Blower Door

Tabla 1. Variables ambientales interiores y energéticas monitorizadas; CA = Cámara de aire; Ret. = Retorno; DSF = Fachada doble piel.

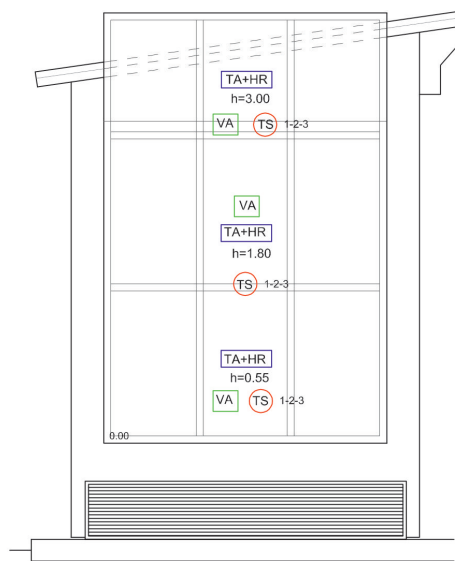
	Variable	Sonda	Nº	Ubicación	Ud.	Rango medición	Precisión
<b>Calidad del aire interior</b>	Temperatura aire	Termómetro	16 4 7	Interior Conducto CA DSF	°C	-40+80 -10+60 -40+105	±0.15 ±0.3 ±0.15
	Humedad relativa	Higrómetro	4 7	Interior CA DSF	%	0-100	± 5%
	Temperatura superficial	Termopar	28 4 16 8	Interior Fachada Ext.Fachada CA DSF Exterior DSF	°C	-30 + 350	±0.2%
	Flujo de calor	Termopar	4	Interior Fachada	W/m²	-10...+10 x103	± 5 %
	Concentración CO <sub>2</sub>	Detector CO <sub>2</sub>	4	Ret. clima	lux	0-2000	±2.0%
	Iluminancia natural	Luxómetro	8	Interior	lux	0-200000	±3.0%
	Velocidad del aire	Anemómetro	4 8	Conducto CA DSF	m/s	0.1 +2 0 +5 -1 +1	±0.06% ±3% ±1%
	Radiación solar: infrarroja.	Pirgeómetro	1	Exterior DSF sur	W/m²	-300 +100	±3.0%
	Radiación solar	Piranómetro	1	Exterior. Posición vertical.	W/m²	0-4.000	±2.0%
Radiación solar (infrarroja)	Pirgeómetro	1	W/m²		-300, +100	±3.0% (-10, 40°C)	
<b>Eficiencia Energética</b>	Tensión	Voltímetro	8	Cuadro eléctrico	V	-	-
	Corriente	Amperímetro	8	Cuadro eléctrico	A	-	-
	Potencia	Potenciómetro	8	Cuadro eléctrico	W	-	-
	Energía	Contador	4	Cuadro eléctrico	kWh	-	-
	Energía reactiva	Contador	4	Cuadro eléctrico	kVAr	-	-

Tabla 2. Variables ambientales exteriores monitorizadas: listado de sondas en la estación meteorológica dispuesta en cubierta.

Tipo	Variable	Sonda	Nº	Ubicación	Ud.	Rango medición	Precisión
<b>Condiciones exteriores</b>	Temperatura aire	Termómetro	2	Estación Meteorológica	°C	-40,+80	±0.15 ± 0.1%
	Humedad relativa	Higrómetro	1		%	0-100	±3% ± 5%
	Iluminancia natural	Luxómetro	1		lux	0-200000	±3.0%
	Concentraciones CO <sub>2</sub>	Detector CO <sub>2</sub>	1		ppm	0-2.000	±2.0%
	Velocidad viento	Anemómetro	1		m/s	0-50	±0.5
	Dirección viento	Veleta	1		°	0-360	±2.5
	Radiación solar: global horizontal, difusa, N, S, E, O.	Piranómetro	6		W/m²	0-2000	±1.5%



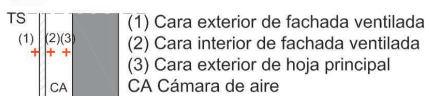
MODULO 1 - CELDA (sur)



MODULO 1 - CELDA (norte)



- Estación meteorológica.
- Sensor de temperatura ambiental interior.
- Sensor de humedad relativa interior.
- Transmisor de CO<sub>2</sub> interior.
- Sensor combinado de flujo de calor y temperatura superficial.
- Luxómetro interior.
- Piranómetro
- Sonda de velocidad del conducto de aire y temperatura.
- Pirgeómetro.
- Sonda combinada de temperatura del aire y humedad relativa.
- Sonda de temperatura de contacto. Termopar tipo T.
- Sonda de velocidad de aire.
- Sonda de velocidad de aire.
- Sonda combinada de velocidad de aire, temperatura y sentido del flujo.



Esquema ubicación termopares

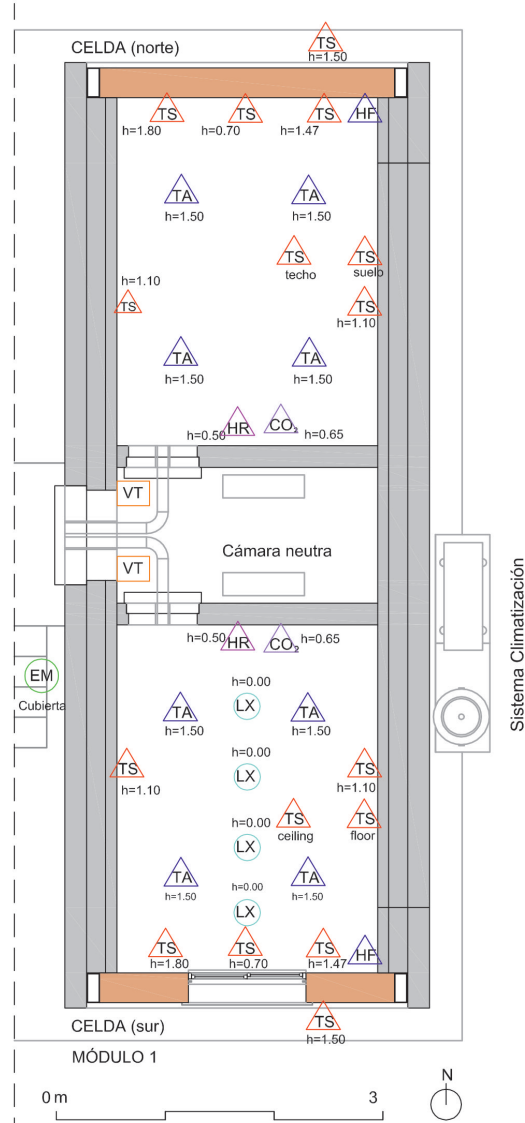


Figura 6. Ubicación y descripción de los equipos de monitorización en Módulo 1. Idem para Módulo 2.



## 4. Evaluación de resultados

El tratamiento y análisis de los resultados monitorizados se realiza mediante diferentes técnicas a partir de un tratamiento estadístico de los datos. Para ello, los datos obtenidos se exportan a un formato tipo .csv, para su lectura en Microsoft Excel 2016 ©. De forma general, la interpretación de resultados y análisis estadístico de los datos monitorizados se realiza con el módulo Statistics Toolbox de Matlab. No obstante, se han utilizado, adicionalmente, otros programas de análisis tales como Microsoft Excel, Stata, Statgraphics o SPSS.

### 4.1. Calidad ambiental interior

Dada la carencia de sistemas activos en la vivienda social andaluza, y por lo tanto con consumos energéticos son muy bajos, el principal parámetro de análisis es la calidad ambiental interior (8). Este análisis se aborda mediante la evolución dinámica del comportamiento energético del recinto, de temperatura y humedad relativa interior, junto con el análisis estadístico descriptivo de aproximación y porcentaje de horas de confort, comparando con modelos de confort estáticos (ISO 7730:2005) y adaptativos (ASHRAE standard 55-2017 y UNE-EN 15251:2008).

### 4.2. Validación modelos de simulación

Los datos de monitorización sirven como soporte para la necesaria validación empírica de los modelos de simulación energéticos o de métricas dinámicas predictivas de iluminación natural (9).

El empleo de técnicas estadísticas permite optimizar los tiempos de computación de los modelos de simulación. Así el empleo de análisis de sensibilidad y técnicas de calibración bayesiana posibilitan reducir las incertidumbres entre las mediciones experimentales y los modelos de simulación. Además, el análisis de los parámetros más influyentes para la calibración de los modelos de simulación facilita reducir el número de parámetros a considerar en el proceso de calibración (10).

### 4.3. Modelos numéricos

La complejidad de los procesos termodinámicos y de transferencia de calor en cerramientos como la fachada de doble piel son difícilmente reproducidos por herra-

mientas de simulación energética basados en Energy Plus y oficiales (HULC, CE3X).

Por ello surge la necesidad de desarrollar modelos numéricos dinámicos, precisos y fiables, con Free-Fem++ y técnicas CFD, que se basan y son validados con los datos de monitorización (11). Estos modelos permiten ampliar el rango de variables de análisis, incorporando los efectos de transferencia por radiación en el interior o la estimación de la cantidad de energía calorífica acumulada por la envolvente, y por tanto, capturar de forma eficiente el efecto de inercia térmica de la misma, variable de interés en un escenario de calentamiento global.

### 4.4. Diseño y optimización de soluciones para la rehabilitación de fachadas

El análisis de los resultados obtenidos in situ de forma simultánea entre las dos soluciones de fachada (actual y rehabilitada) permite valorar el comportamiento térmico y las condiciones de confort que supone la estrategia de mejora de la fachada mediante la incorporación de aislamiento térmico, con una solución tipo SATE o fachada de doble piel, principalmente en condiciones de libre evolución que son las predominantes en la vivienda social andaluza.

La optimización de las soluciones de aislamiento se realiza con modelo de simulación previamente validados (8), utilizando los modelos numéricos para el diseño y optimización paramétricamente de soluciones de fachada de doble piel (12).



Figura 7. Imágenes infrarrojas y visuales de las celdas en orientación sur. Izquierda cerramiento sin rehabilitar, derecha solución rehabilitada.

## 5. Conclusiones

Las celdas de ensayo del grupo de investigación TEP 130 de la Universidad de Sevilla son un laboratorio experimental que permite evaluar la mejora de las condiciones ambientales de una habitación tipo de una vivienda en clima mediterráneo sin la influencia del usuario, evaluando de forma simultánea las condiciones de eficiencia energética y calidad ambiental interior debido a la mejora de la envolvente térmica tanto en la solución original como en la propuesta de rehabilitación.

El equipamiento de las celdas de ensayo, mediante un amplio dispositivo de sensores y sistema de adquisición de datos, puede ofrecer un amplio abanico de pruebas y protocolos obteniéndose datos empíricos esenciales de variables ambientales y energéticas, así como su evolución en el tiempo. Este conjunto de datos servirá como herramienta inicial para evaluar la calidad ambiental interior, validar modelos de simulación y desarrollar modelos numéricos que sirven para el diseño y optimización de soluciones para la rehabilitación de fachadas, tanto en condiciones dinámicas actuales como en un escenario de cambio climático. Esta evaluación y toma de decisiones se proyectarán posteriormente en las actuaciones de rehabilitación en la vivienda social andaluza.

## 6. Bibliografía

- (1) A. Carratt, G. Kokogiannakis, D. Daly. (2020). A critical review of methods for the performance evaluation of passive thermal retrofits in residential buildings. *Journal of Cleaner Production*, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121408>.
- (2) Escandón, R., Suárez R., Sendra, J.J. (2017). On the assessment of the energy performance and environmental behaviour of social housing stock for the adjustment between simulated and measured data: The case of mild winters in the Mediterranean climate of southern Europe. *Energy and Buildings*, 152, 418–433.
- (3) Guerra-Santin, O.; Tweed, C.A.. (2015). In-use monitoring of buildings: An overview of data collection methods. *Energy and Buildings*, 93, 189-207
- (4) G. Cattarin, F. Causone, A. Kindinis, L. Pagliano. Outdoor test cells for building envelope experimental characterisation – a literature review. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 54 (2016), pp. 606-625.
- (5) TEP-130: Arquitectura, patrimonio y sostenibilidad. Acústica, iluminación, óptica y energía. Disponible en: <https://grupo.us.es/grupotep130/es/> (accedido a 10 Mayo 2020).
- (6) León-Rodríguez, A. L., Suárez, R., Bustamante, P., Campano, M.A., Moreno-Rangel, D. (2017). Design and Performance of Test Cells as an Energy Evaluation Model of Facades in a Mediterranean Building Area. *Energies*, 10 (11), 1-16-. doi: 10.3390/en10111816.
- (7) Fernández-Agüera, J., Domínguez, S., Sendra, J.J., y Suárez, R. (2018). Social housing airtightness in Southern Europe. *Energy and Buildings*, 185, 377-391. doi:10.1016/j.enbuild.2018.10.041.
- (8) Calama-González, C. M., Suárez, R., León-Rodríguez, A. L., Domínguez Amarillo, S., (2018). Evaluation of Thermal Comfort Conditions in Retrofitter Facades Using Test Cells and Considering Overheating Scenarios in a Mediterranean Climate. *Energies*, 11 (4), 788-

doi: 10.3390/en11040788.

- (9) Campano, M.A., Acosta, I.J., Leon Rodriguez, A.L., Calama, C.M. (2018) Validation study for daylight dynamic metrics by using test cells in Mediterranean area. Comunicación en congreso. 5th International Conference on Civil and Urban Engineering. Barcelona, España.
- (10) Calama-González, C.; Symonds, P.; Petrou, G.; Suárez, R.; León-Rodríguez, A.L. (2020) Bayesian Calibration of Building Energy Models for Uncertainty Analysis Through Test Cells Monitoring. Applied Energy 282 , 116118.
- (11) Domínguez-Torres, C. A., León-Rodríguez, A. L., Suárez, R., Domínguez-Delgado, A. (2019). Numerical and experimental validation of the solar radiation transfer for an egg-crate shading device under Mediterranean climate conditions. Solar Energy, 183, 755-767. doi: 10.1016/j.solener.2019.03.05.
- (12) Escandón, R., Suárez, R., León, A.L., Alonso, A. Double-skin façades optimization to address climate change challenge in Mediterranean social housing. FACADES19 - South Challenges and beyond, 22 November, 2019, Lisboa (Portugal).



# Ensayos experimentales de estrategias de mejora de la eficiencia energética en los demostradores EDEA CICE

INTROMAC

**I. Amigo(1), A. Perianes(2)**

(1) Arquitecta. Técnico de proyectos. INTROMAC, Cáceres (España).

(2) Arquitecta. Técnico de proyectos. INTROMAC, Cáceres (España).

Persona de contacto/Corresponding author: irene.amigo@juntaex.es (I. Amigo)

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4532-045X> (I. Amigo); <http://orcid.org/0000-0002-7960-6480> (A. Perianes)

## Ensayos experimentales de estrategias de mejora de la eficiencia energética en los demostradores EDEA CICE

## *Experimental tests of energy efficiency improvement strategies in the EDEA CICE demonstrators*

### RESUMEN

Se presentan en el texto una muestra de los ensayos experimentales llevados a cabo en las instalaciones de los demostradores experimentales EDEA CICE. Se recogen, a modo ejemplarizante, cuatro estrategias distintas de mejora de la eficiencia energética, mejora del confort higrotérmico de los espacios habitables interiores de las viviendas, reducción del consumo energético, y combinación de estrategias que permiten demostrar experimentalmente la aplicabilidad de medidas activas y pasivas hacia un desempeño energético más eficiente y más sostenible. Las estrategias presentadas son: mejora del aislamiento térmico, uso de persianas, ventilación natural, y el uso de la chimenea solar como estrategia aislada o combinada con el sistema de intercambiador tierra-aire. A través de las estrategias presentadas se define la metodología utilizada hasta ahora, los equipos de monitorización y control disponibles, y la variabilidad de proyectos y aplicaciones que ofrecen las viviendas experimentales.

**Palabras clave:** Eficiencia energética; monitorización; demostrador experimental; confort; vivienda social.

### ABSTRACT

*The text presents a selection of the experimental tests conducted at the facilities of the EDEA CICE experimental demonstrators. Four different strategies for improving energy efficiency, improving the hygrothermal comfort of indoor living spaces, reducing energy consumption and combining strategies to experimentally demonstrate the applicability of active and passive measures for more efficient and sustainable energy performance are presented as examples. The strategies presented are: improvement of thermal insulation, use of blinds, natural ventilation, and the use of the solar chimney as an isolated strategy or combined with the earth-air exchanger system. Through the strategies presented, the methodology used to date is defined, the monitoring and control equipment available, and the variability of projects and applications offered by the experimental houses are assessed.*

**Keywords:** Energy efficiency; monitoring; experimental demonstrator; comfort; social housing.

# 1. Introducción

Los casos o estrategias presentados se realizan en las instalaciones EDEA CICE –Centro de Innovación y Calidad en de la Edificación– son sólo una muestra de los realizados en las instalaciones, presentando la metodología llevada a cabo y los resultados más relevantes obtenidos.

## 1.1. Características de las instalaciones

Las instalaciones EDEA CICE se componen por dos viviendas a tamaño real construidas con las características propias de las viviendas de protección oficial de la Junta de Extremadura, en cuanto al programa funcional, adaptado a las definiciones constructivas propias determinadas por la normativa de la edificación aplicable en el momento de la construcción, 2009. Estas viviendas están posicionadas como viviendas en hilera, pero físicamente separadas por una campa de instalaciones que sirve a las dos viviendas, evitando la interferencia de las mismas en los distintos ensayos. El entorno inmediato en el que se encuentran ubicadas todas estas instalaciones permite el control de las condiciones de contorno durante el desarrollo de los ensayos programados.

EDEA CICE se encuentra ubicado en Cáceres, en zona climática C4, predominante en la geografía extremeña. Esto permite en origen poder extraer conclusiones directas aplicables a futuras o existentes viviendas; y extrapolable a otras zonas climáticas o construcciones.

## 1.2. Sistema de monitorización

El sistema de monitorización engloba a la VE, la VP, y la sala de instalaciones (Servidor Tomcat, con BBDD SQL) y controladas mediante un sistema de control y telegestión SCADA, de tipo propietario Siemens, DESIGO 5.0; el cual permite visualizar, comparar y medir en tiempo real las condiciones existentes en cualquier periodo de tiempo. EDEA CICE cuenta con estación meteorológica propia y 238 puntos de medición (85 en la vivienda patrón y 153 en la experimental) agrupados por zonas y conectados a grupos de módulos de adquisición de datos que transmiten información vía Ethernet a un cuadro centralizador conectado al PC de gestión, el cual contiene una aplicación de visualización, como la pantalla mostrada en la Figura 1, y control accesible desde internet mediante acceso de escritorio remoto y VPN.



Figura 1. Pantalla de visualización del sistema de gestión

### 1.3. Proyectos desarrollados en las instalaciones y líneas de investigación.

EDEA CICE tiene su origen en El Proyecto EDEA, Development of Eco-Efficient Architecture: Methods and Technologies for Public Social Housing Building in Extremadura, fue cofinanciado por el Programa Life+07 y desarrollado en el periodo 2009-2013 [1] cuyo objetivo principal era desarrollar una edificación más rentable, sostenible, y de mejor calidad, bajo la premisa de una tipología de vivienda destinada a un usuario final muy concreto, pero cuyas conclusiones del estudio podrían ser extrapolables a un parque edificatorio mayor, fomentando la innovación en el sector.

A este inicial proyecto le sucede el Proyecto EDEA RENOV, Development of Energy Efficiency in Architecture: Energy Renovation. Innovation and ICTs, fue cofinanciado por el Programa Life durante los años 2010 a 2015. En este caso el objetivo se encuentra enfocado, a grandes rasgos, a los procesos de rehabilitación [2].

A estos dos proyectos iniciales le han sucedido otros que utilizan las instalaciones EDEA CICE para el desarrollo e implementación de soluciones de investigación e innovación en el campo de la construcción, la arquitectura, la sensorización, y monitorización, las instalaciones de climatización, e instalaciones de energías renovables entre otros. Como el proyecto ReNaturalN-ZEB ensayar y promover nuevas soluciones constructivas para alcanzar Edificios de Consumo de Energía Casi Nulo con baja huella de carbono, utilizando materiales naturales y reciclados, en España y Portugal [3], el proyecto IDERCEXA [4], y el proyecto ENCORE [5], entre muchos otros proyectos y estudios a distintas escalas y de distinta índole.

## 2. Estrategia 1: mejora del aislamiento térmico en la fachada norte

Tras la realización de simulaciones de comportamiento energético de la aplicación de estrategias pasivas en la vivienda, se ha comprobado que una mejora del aislamiento térmico en la fachada Norte del edificio mejora el comportamiento energético respecto a aplicar la medida en otra orientación. Las simulaciones se han realizado con Design Builder y otros programas de verificación

normativa como Calener VyP. El objetivo por tanto de esta estrategia es evaluar la mejora del confort térmico del espacio interior sin climatizar, en régimen libre.

La estrategia de mejora se aplica sobre el cerramiento vertical de fachada de la Vivienda Experimental (VE). La solución constructiva base de la Vivienda Patrón (VP) y de la VE consiste en, de exterior a interior, 1/2 pie de ladrillo perforado 11,5 cm, mortero de cemento 1,5 cm, lana de roca 3,5 cm, cámara de aire sin ventilar 5 cm, panel de cartón yeso de 1,5 cm. La adición de aislamiento térmico se aplica sobre los espacios habitables de fachada con orientación Norte: cocina, aseo, entrada, dormitorio 2 y dormitorio 3. El aislamiento térmico adicionado es lana mineral MW con  $\lambda = 0,034 \text{ W/m}^2\text{K}$  de 5 cm de espesor. El periodo de ensayo tuvo lugar en estación fría, del 27 de febrero al 1 de marzo del mismo año, de manera continua.

El estudio se realiza en régimen libre. Las variables monitorizadas fueron temperatura ambiental interior, humedad relativa interior, tanto en VE como en VP para poder comparar el comportamiento. Ambas variables son medidas en todas las estancias del edificio y en distintas ubicaciones relativas del mismo.

Los datos se han adquirido a través de sensores de tipo ambiental temperatura y humedad relativa Siemens QFA2060 cuyas características se definen en la Tabla 1. El número de sensores utilizado en cada vivienda es de 8 sensores tipo ambiental T y H en orientación Norte, y 14 sensores en estancias de orientación Sur. La frecuencia de toma de datos es cada 30 s por protocolo ModBus con almacenamiento local en servidor propio y gestión por interfaz de sistema propietario Desigo Siemens. El sistema es de código propietario con conexión local y comunicación alámbrica y vía Ethernet.

Tras la recepción de los datos de ambas variables sensorizadas, se realiza un análisis comparativo de los datos recogidos en los sensores paralelos ubicados en VE y VP.

La metodología llevada a cabo en esta estrategia se basa en que el estudio se realiza en régimen libre (sin climatizar), durante tres días completos y la mejora de aislamiento implementada sólo en la VE se desmonta tras el periodo de ensayo. Las variables a medir/comparar son temperatura ambiental con sonda de referencia VP\_Ta\_Pxx\_x y VE\_Ta\_Pxx\_x, para realizar la compa-



ración se realiza la media aritmética de los datos obtenidos de las sondas ambientales dispuestas en cada recinto. Este mismo procedimiento se realiza con las sondas de humedad relativa (VP\_H\_Pxx\_x y VE\_H\_Pxx\_x), posibilitando el comportamiento psicrométrico del recinto. Antes de iniciar el periodo válido de ensayo, se comprueba que las estancias en ambas viviendas tienen comportamientos térmicos similares y las variables medidas son proporcionalmente iguales.

### 3. Estrategia 2: apertura y cierre de persianas

El objetivo principal del ensayo de esta estrategia es estudiar las consecuencias en el consumo energético, empleado para lograr las condiciones de confort en el interior de las viviendas, de la utilización de los protectores solares tipo persianas en huecos acristalados.

Los huecos acristalados sobre los que se aplica la estrategia se ubican en fachada Norte y Sur de los espacios habitables de planta baja y primera de la VE. Las ventanas son de color blanco, metálicos, sin rotura de puente térmico con una  $U = 5,7 \text{ W/m}^2\text{K}$ . La permeabilidad es inferior a  $3 \text{ m}^3/\text{h}$ . El acristalamiento es de vidrio doble 4/6/6mm con  $U = 3,3 \text{ W/m}^2\text{K}$ . El factor solar de los vidrios es 0,75. Las persianas utilizadas para el ensayo de la estrategia son de PVC enrollable con capialzado en el dintel del hueco. Las viviendas permanecen durante todo el ensayo a temperatura constante  $20^\circ\text{C}$

asegurada a través del uso de un sistema de bomba de calor con impulsión por fancoils.

El periodo de monitorización del ensayo de la estrategia es en periodo invernal, desde el 11 al 21 de marzo ambos inclusive, y de manera continua.

Los equipos y las variables controladas para el desarrollo y estudio de esta estrategia son la estación meteorológica con sensor de temperatura y humedad exteriores, anemómetro, pirgeómetro, y piranómetro; sensores de temperatura ambiental interiores: temperatura y humedad\*; sensores de posición de persianas; sondas de radiación solar incidente sobre vidrio, y medidores de consumo eléctrico monofásico. Las características principales de los sensores están descritas en la Tabla 1. El sistema conjunto de monitorización es gestionado por el sistema propietario Desigo basado en protocolo Modbus con comunicaciones via Ethernet y almacenamiento en servidor local. En esta estrategia las mediciones de las distintas variables se realizan cada 5 minutos de manera continuada.

Se comparan entre sí los consumo eléctricos de las bombas de calor ubicadas en VE y VP. Los resultados son analizados bajo las premisas de que la temperatura interior de los espacios habitables se ha mantenido constante e igual en ambas viviendas, y la radiación solar incidente se coteja con la información meteorológica captada por la estación. De esta manera se podrían justificar diferencias entre consumos obtenidos bajo las distintas condiciones operativas del ensayo, debido a la nubosidad u otras condiciones meteorológicas.

Tabla 1. Características de los sensores

Ambiente	Estación meteorológica				Sensores interiores		Inmersión	Cuadro eléctrico
Sensor	Tª y Hr	Anemómetro	Pirgeómetro	Piranómetro	Tª ambiental y Hr	CO <sub>2</sub>	Tª	Consumo eléctrico monofásico
Rango de medida	0-100% RH -50 a +50°C	0-360° 0+60m/s	±1000W/m <sup>2</sup>	0 a 4000 W/m <sup>2</sup>	Siemens QFA2020	Siemens QPA2002	Siemens QAE2120	Circuitor CEM-C10
Precisión	±1% HR; ±0,3°C	± 3°; ±2%			-15 a +50°C; 0 a 100%	0 - 2000 ppm	-30 a +130°C	
Sensibilidad			15 µV/V/m <sup>2</sup>	15 µV/V/m <sup>2</sup>	± 3%			Energía Activa clase B EN50470
Señal de salida	4/20mA	4/20mA	4/20mA	4/20mA	0-10V CC o LG-Ni 1000	0-10V CC	0-10V CC o LG-Ni 1000	Impulsos optoacoplada max.24 Vcc 50 mA
Potencia requerida	5-30V a 46 mA	9-30V a 40mA	1,6W a 12V CC	1W a 12V CC	13,5-35V 24 C CA	24V 15-35V		

La metodología aplicada a este ensayo parte de un aseguramiento de las condiciones térmicas constantes interiores, 20°C, mediante el uso de una bomba de calor cuyo consumo energético es monitorizado. Estas condiciones se aplican tanto en la VE como en la VP, encontrándose ambas en las mismas condiciones operativas. Se establecen 5 escenarios para apertura-cierre de persianas según horarios aplicables a la VE, la VP permanece siempre con las persianas abiertas como estado de referencia. En ningún caso se accede al interior de las viviendas, todos los escenarios son controlados de manera remota para no distorsionar las condiciones de partida comparativas entre VE y VP. Escenario 1 con las persianas siempre abiertas. Este escenario se utiliza como estadio cero de calibración. Escenario 2. VE con las persianas siempre cerradas. Escenario 3. Las persianas de la VE se encontraban al 50% todo el día. Escenario 4. Se simula el accionamiento de las persianas con el equivalente a un horario de ocupación, las persianas de la VE se mantienen abiertas de 8:30 a 20:30. Escenario 5. La apertura de persianas se realiza de 7:30 a 18:30.

Debido a la variabilidad de las condiciones atmosféricas exteriores no se pueden extraer conclusiones de comparativa de valor absoluto entre los distintos escenarios, pero si comparativamente gracias a la presencia de la VP que permanece como elemento de referencia. Las conclusiones sólo pueden extraerse para la estación fría, el comportamiento para la estación cálida debería extrapolarse según simulaciones informáticas.

En líneas generales y por escenarios, el Escenario 1 permite confirmar que la diferencia entre las dos viviendas es de un 2% en el consumo. En el Escenario 2, se tuvo que realizar en diferentes días debido a que la nubosidad no permitía obtener valores representativos, y como conclusión es que no era beneficioso dejar las persianas permanentemente cerradas en las condiciones operativas exteriores del periodo monitorizado. Cuanto más soleado fuese el día, más beneficioso es dejar las persianas subidas todo el día en condiciones operativas de invierno. El Escenario 3, con las persianas permanentemente al 50% no produjo conclusiones generalizables debido a la variabilidad de las condiciones de soleamiento. Los Escenarios 4 y 5 vislumbran que, aunque no sea posible determinar de manera empírica el horario más

eficiente para apertura y cierre de ventanas, la alternancia en el estado de las mismas en función de las condiciones ambientales exteriores es requisito imprescindible para un comportamiento eficiente del edificio. [6]

## 4. Estrategia 3: ventilación natural

Se establecen tres objetivos relativos al estudio de estrategias de ventilación natural; el primero es evaluar el descenso de la temperatura en invierno en el interior de los espacios habitables de la vivienda debido a la ventilación por apertura de ventanas en el caso 1. El segundo objetivo es valorar la mejora de la calidad del aire interior en términos de concentración de CO<sub>2</sub> en función de la renovación del aire interior por ventilación natural a través del caso 2. Y el tercer objetivo planteado en cuanto al análisis de las estrategias de ventilación en el caso 3, es la influencia en el consumo de calefacción en régimen de invierno.

Las estrategias de ventilación se aplican sobre la VE, la VP permanece como caso de referencia. El periodo de analizado en el que se aplican las estrategias planteadas abarca desde el 28 de enero hasta el 22 de febrero de 2013, por lo que el régimen estacional estudiado es de invierno.

Se monitorizan para esta estrategia variables exteriores de temperatura y humedad, junto con las condiciones atmosféricas a través de la estación meteorológica. Las variables interiores analizadas para esta estrategia son la temperatura ambiental y la humedad relativa de las estancias habitables, 22 sensores por vivienda. También se realiza un estudio comparativo de la variable sobre calidad de aire: concentración de CO<sub>2</sub> en las estancias interiores, sin la alteración propia de la presencia de usuarios, se evalúan los datos de 10 sensores. Se analiza el consumo eléctrico del sistema de calefacción activado en las viviendas para el mantenimiento de las condiciones interiores en el caso del ensay de ventilación con calefacción. Debido a que la estrategia ensayada versa sobre ventilación natural, en este caso a través de la apertura y cierre de ventanas, se hace uso de los sensores de ventanas que indican el estado de las mismas.

Los datos de las distintas variables se adquieren a través de sensores dispuestos en la estación meteorolo-

lógica, sensores de temperatura y humedad interiores como los de la Figura 2, sensores de concentración de CO<sub>2</sub>, y medidores de consumo eléctrico, cuyas características se describen en la Tabla 1.



Figura 2. Sensores de temperatura y flujo térmico

Tras la recepción de los datos de las distintas variables sensorizadas, se realiza un análisis comparativo de los datos recogidos en los sensores paralelos ubicados en VE y VP. Los resultados son analizados bajo las premisas de que los casos 1 y 2 se realizan en régimen libre (sin climatizar), en el caso 3 se mantiene el interior de la vivienda a temperatura ambiente constante de 20°C a través de sistemas activos de calefacción por bomba de calor. La frecuencia de toma de datos es cada 30 s, recibiendo la señal por protocolo ModBus con almacenamiento local en servidor propio y gestión por interfaz de sistema propietario Desigo Siemens, la comunicación es alámbrica y vía Ethernet.

El procedimiento a seguir para la realización de los ensayos de la estrategia de ventilación se han dividido en tres casos, el primero de ventilación natural en comportamiento térmico libre; el caso 2 se basa en el estudio de la ventilación natural con el objetivo de renovación de aire para control de la concentración de CO<sub>2</sub> en el interior de los espacios; y el caso 3 que trata de determinar la influencia en el consumo energético de la ventilación de estancias calefactadas bajo la premisa de que la temperatura interior es 20°C. En el caso 1 se realiza la apertura controlada de ventanas de VE por duración determinada de: 0, 5, 15, 30, 45, y 60 minu-

tos y se evalúa el comportamiento higrotérmico de las estancias interiores a través de la variable temperatura ambiental y humedad relativa mediante la comparación de las sondas paralelas de recinto entre VE y VP. Las conclusiones extraídas de la experiencia muestran que periodos de ventilación de más de 30 minutos no se recuperan de manera pasiva por inercia térmica, como conclusión el tiempo de apertura durante una jornada de invierno no debería ser superior a 15 minutos, permitiendo que en construcciones con inercia térmica sea esta la que permita la recuperación calorífica. El caso 2 se basa en el mismo procedimiento que el caso 1, controlar el tiempo de ventilación de la estancia en régimen libre, analizando los datos de concentración de CO<sub>2</sub> para valorar la calidad del aire interior y la necesidad de filtrado. Se concluye que al no estar habitadas las viviendas, la concentración de CO<sub>2</sub> no dista mucho de la concentración en el aire exterior, y por lo tanto el estudio no es concluyente. En el caso 3 se utiliza como equipo de climatización un sistema de bomba de calor para asegurar las condiciones térmicas de confort en el interior de manera permanente. Los periodos de ventilación evaluados serán los mismos que en el caso 1 y 2, pero se realiza un estudio comparativo entre VE y VP del consumo del equipo de calefacción. Este último ensayo permite determinar que si la apertura para ventilación es de hasta 5 minutos, la diferencia entre el consumo energético de VE y VP es despreciable. Desde los 10 a los 30 minutos el consumo de la VE aumenta entre un 15-20% respecto a la VP, con una ventilación durante 45 minutos el consumo de la VE aumenta más de un 20% respecto a la VP [6][7].

Se ha de tener en cuenta que las condiciones de la realización de los ensayos en régimen de no ocupación y sin fuente de generación de CO<sub>2</sub>, no permiten la valoración del impacto de la ventilación en la reducción de su concentración para optimizar el tiempo de ventilación en función de la calidad del aire y del consumo energético. Otro aspecto relevante es que la apertura y cierre de las ventanas se realiza manualmente debido a la inexistencia de automatización de apertura y cierre de las mismas aunque si esta sensorizada la posición (abierto/cerrado), lo que ralentiza los ensayos al tener que equilibrar los valores de las variables a analizar en las viviendas antes del comienzo de los mismos.

## 5. Estrategia 4: chimenea solar

El principio de funcionamiento de la chimenea solar es el siguiente: el sol incide sobre la superficie acristalada orientada al sur. La radiación solar transmitida a través del vidrio llega hasta la placa metálica pintada de negro que se encuentra en el interior de la chimenea, paralelamente al vidrio. Esta placa, que llamaremos placa absorbedora, se calienta y a su vez, calienta por convección el aire situado entre ella y la placa absorbedora. El aire calentado disminuye su densidad y se eleva verticalmente, generándose un flujo de aire ascendente movido por convección natural. Las aplicaciones de la chimenea solar en edificación son básicamente tres: ventilación, refrigeración y calefacción. La instalación se realiza sobre la fachada sur de la VE. La chimenea solar instalada en los demostradores se completa con que en cada una de las dos plantas que componen el edificio experimental, existen dos rejillas en cada una de las plantas, una casi a ras de suelo y otra próxima al techo de cada planta. Estas cuatro rejillas comunican las estancias con la chimenea [8].

### 5.1. Chimenea solar en régimen de verano

Los objetivos que se pretenden conseguir mediante la realización del ensayo del uso de la chimenea solar para ventilación en régimen de verano son: evaluar el funcionamiento, especialmente desde el punto de vista de la eficiencia energética y la sostenibilidad, de una chimenea solar, así como analizar las condiciones de confort alcanzadas en verano en el interior de la vivienda con este sistema frente a otra vivienda que no lo tenga. Además de valorar la sensación térmica y temperatura en el interior de la vivienda que se obtiene con su empleo, tanto por las noches, como por el día, realizando una ventilación cruzada.

El fundamento en el que se basa la ventilación y refrescamiento mediante chimenea solar radica en el hecho de que el aire en movimiento reduce la sensación de calor. El límite en el que la velocidad del aire llega a ser incómodo se sitúa en  $1,1 - 1,2$  m/s. Con lo cual se puede llegar hasta una temperatura efectiva  $6^{\circ}\text{C}$  menor que la temperatura seca del aire. Este ensayo trata de comprobar la eficacia de una chimenea solar en verano para distintas condiciones de ventilación a diferentes

horarios. En verano, durante las horas de Sol del día, la temperatura exterior es superior a la del interior de las viviendas, por lo que no es recomendable abrir las ventanas al norte para realizar una ventilación cruzada. El esquema básico de funcionamiento en régimen de verano se muestra en la Figura 3. La ventilación cruzada se realizaría a horas en las que el Sol no esté presente y la temperatura exterior haya caído, principalmente de noche. Así pues se establecen horarios de apertura de ventanas de las distintas fachadas, Norte y Sur, y la disposición de las aberturas de la chimenea. Las viviendas permanecen en régimen libre y se comprueba en el estado inicial que la VE y VP tienen comportamientos térmicos idénticos.

El ensayo de esta estrategia tiene lugar en régimen de verano desde el 16 hasta el 27 de junio de 2014 de manera continuada.

Se monitorizan las variables atmosféricas exteriores mediante los datos obtenidos de la estación meteorológica. Las temperaturas ambientales y humedad relativa interiores de las VE y VP. Las temperaturas del aire del interior de la chimenea solar en las alturas de rejilla, caudal de aire en el interior de la chimenea y en las rejillas de salida/entrada. Las características de los sensores se muestran en la Tabla 1. El sistema de captura y almacenamiento de datos ha sido descrito en los apartados 2, 3, y 4.

Cabe señalar que hemos realizado ese ensayo durante el verano y el resultado obtenido no ha sido el de una bajada de temperatura en la vivienda experimental, con lo que quedaría en entredicho esta utilidad de refrigeración de la chimenea solar. La chimenea solar se puede utilizar junto con otras técnicas de enfriamiento pasivo como, por ejemplo, el enfriamiento evaporativo en climas con veranos secos. De esta forma se aumenta la humedad a niveles de confort higrotérmico. En lo relativo a la ventilación, el parámetro más importante es el caudal de aire que es capaz de extraer la chimenea solar. A mayor altura de la chimenea solar, mayor es el flujo másico para un ancho del canal dado, existiendo para cada altura un ancho del canal para el cual el flujo másico es máximo.

La conclusión principal es que la chimenea solar instalada en fachada Sur y realizando una ventilación cruzada posibilita una reducción de la temperatura en torno

a 2°C. Además, al realizar el cierre de las ventanas a una hora del día adecuada, mantenemos la temperatura de VE siempre por debajo de la vivienda que no tiene la chimenea solar, VP, con lo cual es menor la temperatura que durante el verano deberíamos disminuir a través de un equipo de refrigeración, lo que se traduce en un ahorro de energía a utilizar para refrigerar la vivienda en el caso de que el objetivo sea mantener la temperatura interior dentro de los rangos de confort normativos.

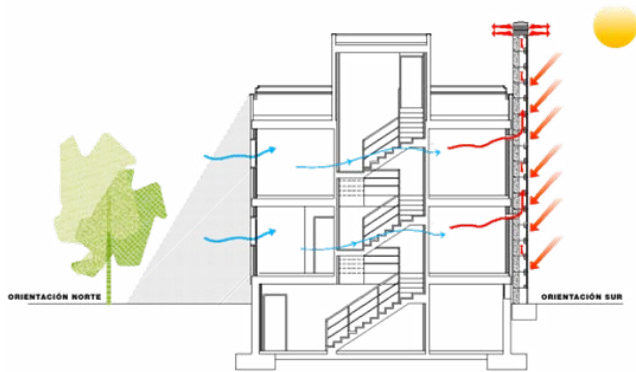


Figura 3 Esquema de funcionamiento de la chimenea solar en régimen de verano

## 5.2. Chimenea solar en régimen de invierno

El objetivo de este ensayo es evaluar el consumo energético alcanzado con la chimenea solar en invierno así como analizar las condiciones de confort alcanzadas en invierno en el interior de las viviendas. Se evaluará el consumo energético de la chimenea utilizada sin otro apoyo auxiliar y el consumo de la chimenea con el apoyo de un intercambiador tierra – aire.

El ensayo de la estrategia se realiza activando la chimenea solar en la VE y la VP se encuentra en las mismas condiciones iniciales de ensayo que la VE salvo por la presencia de la chimenea solar. El funcionamiento de la chimenea solar se analiza inicialmente para régimen libre y posteriormente para régimen interior controlado por el intercambiador tierra-aire con unidad interior fancoils.

El ensayo de la estrategia se realiza en régimen de invierno, desde el 9 al 22 de diciembre de manera continuada.

Los parámetros que se medirán serán la temperatura y la humedad relativa de los locales recintos habitables calefactados. Las sondas de temperatura de la vivienda patrón y de la vivienda experimental se nombrarán como VP\_Ta\_Pxx\_Cmed y VE\_Ta\_Pxx\_Cmed respectivamente. Las sondas que miden la humedad relativa se nombrarán como VP\_H\_Pxx y VE\_H\_Pxx, en las viviendas patrón y experimental. Antes de comenzar el ensayo, las dos viviendas se pondrán a la misma temperatura y humedad relativas para poder comparar las viviendas, partiendo de las mismas condiciones iniciales. Esta información se complementa con la recogida por las temperaturas del aire del interior de la chimenea solar en las alturas de rejilla, caudal de aire en el interior de la chimenea y en las rejillas de salida/entrada. Además de la temperatura y humedad exteriores ofrecidas por la estación meteorológica. Para la fase del ensayo con condiciones interiores estables mediante climatización, se mide también el caudal de entrada al sistema tierra-aire. Las características de los sensores se muestran en la Tabla 1. La frecuencia de recogida de datos es cada 30 segundos.

La metodología aplicada en este ensayo se basa en la apertura y cierre de las compuertas superiores de la chimenea solar para cada una de las estancias a las que está comunicada, en periodos y horarios controlados. Se analiza la diferencia de las curvas de temperatura obtenidas a lo largo del periodo completo de ensayo de los sensores de temperatura ambiente interiores de la VE y VP. Se muestra especial interés en los resultados de los sensores de las estancias al sur discerniendo entre planta baja y planta alta.

Los resultados demuestran que para calentar de la misma manera las habitaciones superpuestas a las que está conectada la chimenea solar, sería necesario cortar el paso del aire de la chimenea en cada una de las plantas, para evitar que todo el aire vaya por convección natural a la planta superior. Además en relación al confort de los usuarios se debe tener en cuenta la estratificación que se produciría, al utilizar la chimenea. Para ello se han tomado los datos de temperatura a nivel de suelo y a nivel de techo, de

las sondas del edificio experimental. La conclusión que se puede obtener de los datos es que se produce una gran estratificación de hasta 6°C, lo que puede pro-

vocar incomodidad en los usuarios, cuando están en funcionamiento los dos sistemas. Mientras que cuando la chimenea no genera calor, la estratificación llega a desaparecer y por tanto el confort aumentará.

La chimenea solar funcionando de manera autónoma logra aumentar la temperatura media hasta 6°C en la planta alta y 2°C en la baja durante dos horas. Esta falta de uniformidad se podría solventar compartimentando la chimenea, para lograr que el caudal de entrada en las dos plantas fuera similar, con lo que conseguiríamos una media de aproximadamente 4°C de aumento en la temperatura. Si utilizásemos una bomba de calor convencional el consumo sería un 32% inferior en la VE durante dos horas, respecto al consumo de la VP

La chimenea solar permite ventilar, precalentando el aire de entrada, lo que supondrá un ahorro energético al no bajar tanto la temperatura de la vivienda, como si ventilásemos abriendo las ventanas. Sin embargo, el caudal de ventilación de la chimenea no es suficiente para cumplir el Código Técnico de la Edificación.

Desde el punto de vista del confort, la chimenea por si sola produce una gran estratificación de hasta el 6°C, pero en cambio disminuye la humedad relativa en torno a un 4% de media.

La utilización conjunta de la chimenea solar con un intercambiador tierra – aire, no produce un aumento significativo de la temperatura respecto a la chimenea solar actuando de forma independiente, pero si aumenta el confort ya que disminuye la estratificación, hasta incluso llegar a hacerla nula.

Sería interesante poder regular el caudal del intercambiador, en función de las necesidades.

El funcionamiento conjunto de ambos sistemas, chimenea solar e intercambiador tierra-aire, es muy útil a la hora de ventilar, ya que se consigue introducir en la vivienda aire más caliente que del exterior. De esta manera la instalación de calefacción principal consumirá menor energía, al ser menor el salto térmico que tiene que aportar.

## 6. Bibliografía

- [1] J. de Extremadura, “Proyecto EDEA | EDEA CICE,” Junta de Extremadura, 2014. <http://www.edeacice.juntaex.es/proyectoedeadea/> (accessed May 29, 2020).
- [2] J. de Extremadura, “EDEA RENOV | EDEA CICE,” 2016. <http://www.edeacice.juntaex.es/edeadea-renov/> (accessed May 29, 2020).
- [3] Proyecto LIFE RENATURAL NZEB, “LIFE RENATURAL NZEB | Materiales y productos naturales y reciclados para alcanzar edificios de consumo de energía casi nulo con baja huella de carbono,” 2019. <https://www.liferenatural.com/> (accessed May 29, 2020).
- [4] I. España-Portugal, “IDERCEXA | Investigación, Desarrollo y Energías Renovables para la mejora del tejido empresarial en Centro, Extremadura y Alentejo,” 2017. <https://idercexa.com/> (accessed May 29, 2020).
- [5] Talos, “ENCORE,” 2020. <http://encorebim.eu/easyconsole.cfm/id/898/lang/en> (accessed May 29, 2020).
- [6] Dirección General de Arquitectura y Vivienda Gobierno de Extremadura et al., “Ensayos Experimentales primeros resultados. Envoltente, instalaciones, monitorización, control. Proyecto EDEA,” 2013. Accessed: May 29, 2020. [Online]. Available: [http://www.edeacice.juntaex.es/wp-content/RESULTADOS\\_EDEA/4.Ensayos\\_experimentales\\_Primeros\\_Resultados.pdf](http://www.edeacice.juntaex.es/wp-content/RESULTADOS_EDEA/4.Ensayos_experimentales_Primeros_Resultados.pdf).
- [7] D. G. de A. y V. G. de Extremadura et al., “Simulaciones y análisis de la sostenibilidad de estrategias pasivas y activas. Proyecto EDEA,” 2013. Accessed: May 29, 2020. [Online]. Available: [http://www.edeacice.juntaex.es/wp-content/RESULTADOS\\_EDEA/3.Simulaciones\\_Analisis\\_Sostenibilidad.pdf](http://www.edeacice.juntaex.es/wp-content/RESULTADOS_EDEA/3.Simulaciones_Analisis_Sostenibilidad.pdf).
- [8] Dirección General de Arquitectura y Vivienda Gobierno de Extremadura, “D09\_Documents on energy improvements in the experimental house and monitoring. Proyecto EDEA RENOV,” 2015. Accessed: May 29, 2020. [Online]. Available: [http://www.edeacice.juntaex.es/wp-content/uploads/2020/03/3.1\\_Estrategias-implementadas-en-vivienda-experimental.pdf](http://www.edeacice.juntaex.es/wp-content/uploads/2020/03/3.1_Estrategias-implementadas-en-vivienda-experimental.pdf).

# Desarrollo de una instalación de bajo costo para la investigación de confort interior

CBBC-UTFPR. Universidad Tecnológica Federal de Paraná (Brasil)

**E. Krüger (1), L. Iwamura (2), G. Celligoi (3), E. González (4)**

(1,4) Dr. Prof. Universidad Tecnológica Federal de Paraná, Curitiba (Brasil).

(2) Dra. Profa. Universidad Federal de Integración Latino-Americana, Foz do Iguaçu (Brasil).

(3) Msc. Arq. Universidad Tecnológica Federal de Paraná, Curitiba (Brasil).

Persona de contacto/Corresponding author: [ekruger@utfpr.edu.br](mailto:ekruger@utfpr.edu.br) (E. Krüger/E. Krüger)

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2895-5530> (E. Krüger)

## Desarrollo de una instalación de bajo costo para la investigación de confort interior

### RESUMEN

Una cámara climática alternativa de bajo costo se ha desarrollado en Curitiba, Brasil, económicamente accesible para grupos de investigación con sede en países en desarrollo. El capítulo describe conceptos, construcción y pruebas de desempeño en una cámara climática de bajo costo, destinada a estudios de confort en espacios interiores. La configuración consta de dos unidades de contenedores independientes y giratorios de 5.4 m<sup>2</sup> con interiores tipo oficina, con ventanas de aluminio convencionales y unidades individuales de aire acondicionado tipo split. La envolvente y las dimensiones de la cámara cumplen con los estándares brasileños existentes. Se han realizado pruebas térmicas, acústicas y de rendimiento lumínico.

**Palabras clave:** cámara climática; confort en espacios interiores; pruebas de desempeño.

## *Development of a low-cost facility for indoor comfort research*

### ABSTRACT

*A low-cost alternative for climate chambers economically accessible to research groups based in developing countries was developed in Curitiba, Brazil. The chapter describes concepts, construction and performance tests in a low-cost climate chamber, intended for indoor comfort studies. The setup consists of two independent and rotating 5.4m<sup>2</sup> container units with office-like interiors, with conventional aluminum windows and split AC-units. Building envelope and dimensions comply with existing Brazilian standards. Thermal, acoustic and luminic performance tests have been carried out.*

**Keywords:** *climate chamber; indoor comfort; performance tests.*



## 1. Introducción

El alto consumo de energía en el acondicionamiento artificial de edificios advierte sobre la importancia de conciliar la eficiencia energética y el confort térmico en el entorno construido. En vista del uso predominante de ambientes interiores en el entorno urbano (4) y la búsqueda de niveles más altos de confort (10), la optimización de los patrones de ocupación puede ser una táctica para mejorar el rendimiento energético de edificios.

Una cámara climática permite controlar variables ambientales y personales, además de simular la exposición humana a situaciones de confort/estrés térmico (5). En Brasil, un estudio preliminar mostró la ausencia de cámaras dedicadas a estudios de confort ambiental. Dicha construcción podría estimular el desempeño de la investigación comparativa, si el modelo puede reproducirse en otros lugares brasileños. Además, se utilizan componentes y construcción estandarizados basados en la adaptación de un contenedor marino. Dicha estandarización es relevante para una replicación de la misma tipología constructiva en otros países. Como la propuesta es de bajo costo, se prevé que será más ampliamente utilizada en países en desarrollo.

### 1.1. Descripción de la CBBC

La Cámara Bioclimática de Bajo Costo (CBBC) se instaló en la Universidad Tecnológica Federal de Paraná, en Curitiba. La ciudad está ubicada en la Zona Bioclimática 1, la más fría de Brasil (1). El clima se clasifica como templado marítimo húmedo (Cfb), en la clasificación Köppen-Geiger. La temperatura media anual es de 16.8 °C, siendo febrero el mes más cálido (promedio de 20.6 °C) y julio el mes más frío (12.9 °C) (8).

En vista de las limitaciones presupuestarias, se exploraron soluciones de bajo costo. Además de la asistencia financiera brindada al proyecto de investigación, se firmaron importantes asociaciones con el sector privado, entre ellos el Grupo Saint-Gobain, Eternit y el ensamblador de contenedores Delta Containers.

La CBBC consta de dos módulos independientes de 5.4m<sup>2</sup> de área interna (MC - módulo de control y ME - módulo experimental), instalados sobre un sistema de rotación manual para permitir estudios comparativos. La climatización se produce por calentamiento/enfriamiento

convectivo. Existen aún, limitaciones del control fino de las condiciones térmicas; sin embargo, el equipo de aire acondicionado del tipo Split ya está muy extendido en Brasil, lo que facilita la replicación de este sistema.

Otra premisa era proporcionar condiciones satisfactorias para el estudio de la percepción de confort en el entorno construido, con los entornos diseñados como si fueran oficinas. Además, se destacan las siguientes pautas técnicas adoptadas en el proyecto CBBC:

- Adecuación a las normas pertinentes;
- Exposición al ambiente externo;
- Dos módulos “walk-in”;
- Rotación independiente de los módulos;
- Bajo peso y ausencia de instalaciones fijas / Transportabilidad;
- Replicabilidad: estandarización de la construcción de contenedores.

El concepto de la CBBC se basó en Norma Brasileira NBR 15.220/2003: rendimiento térmico de los edificios, que define la zonificación bioclimática brasileña y las estrategias constructivas para optimizar el rendimiento térmico del edificio (1). En el Reglamento de Calidad Técnica para el Nivel de Eficiencia Energética de los Edificios (RTQ), a su vez, se evalúan los sistemas de iluminación y aire acondicionado y la interfaz del edificio con el exterior (12). De acuerdo con el RTQ, el dimensionamiento de la envolvente de la CBBC se guió por el cálculo de la transmitancia (U) y la capacidad térmica (CT), lo que resultó en  $U = 0,87 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  y  $CT = 122 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , para paredes y techo. Los valores obtenidos cumplen con los requisitos de NBR 15575-1 con respecto a la transmitancia, y casi cumplen con los de capacidad térmica. ( $Ct = 130 \text{ kJ}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ ).

El carácter flexible del proyecto llevó a la elección de técnicas de construcción en seco. La estructura básica se construyó en un contenedor, siguiendo una tendencia constructiva intensificada en la década de 2010 (4). La descripción del proceso de construcción es presentado por Trevisan et al. (15) (Figura 1)



Figura 1. Cámara bioclimática de bajo costo (CBBC)

## 2. Pruebas de desempeño realizadas

Se han realizado una serie de pruebas para verificar la idoneidad de los ambientes para la investigación en el área de confort ambiental, así como para identificar las limitaciones a considerar. Dichas pruebas comprendieron las dimensiones: térmica, acústica, lumínica y de renovación/calidad del aire.

### 2.1. Comparación térmica de MC y ME

A modo de certificar que ambos módulos tenían un comportamiento térmico similar, se realizó una prueba de similitud del comportamiento térmico de los módulos CBBC para la misma orientación solar, con las ventanas MC y ME orientadas hacia el norte verdadero, entre el 6 y el 9 de abril de 2018, con la persiana cerrada, es decir, sin ganancias solares directas.

Como se esperaba, la similitud del comportamiento térmico en los dos módulos mostró resultados satisfactorios. La Figura 2 muestra las temperaturas medidas a tres alturas en los dos módulos en forma de gráficos de “boxplot”. La Tabla 1 muestra el coeficiente de correlación (R), el error cuadrático medio (RMSE) y el error promedio ( $\bar{E}$ ) entre MC y ME.

Los coeficientes de correlación entre las temperaturas medidas fueron superiores a 0,97, lo que indica un comportamiento térmico similar entre los módulos.

El error promedio fue inferior o cercano a la precisión del equipo utilizado. La prueba de Tukey realizada, para verificar si la distancia entre medias cae dentro de un margen de error del 5%, no mostró diferencias significativas entre MC y ME en las mediciones a 1,10 m. Una vez que se verificó la similitud térmica de los módulos, el MC se adoptó para las evaluaciones de rendimiento.

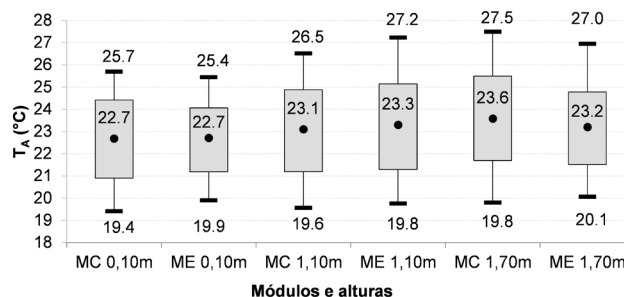


Figura 2. Valores máximos, mínimos y medios, Q1 y Q3 para la temperatura interna en MC y ME, a 0,10 m, 1,10 m y 1,70 m del suelo

Tabla 1. Comparación de la temperatura del aire en °C entre módulos

Posición/variable	0,10 m	1,10 m	1,70 m
R	1,00	0,99	0,97
RMSE	0,19	0,30	0,43
$\bar{E}$	0,09	0,13	0,11

### 2.2. Desempeño térmico

En 2019 se realizaron dos etapas de monitoreo: a fines del verano, entre el 10 y el 14 de marzo, y a principios del invierno, entre el 4 y el 11 de julio.

En ambos casos, la ventana cerrada estaba orientada hacia el norte con una persiana abierta, es decir, con ganancias solares y ventilación natural limitada. Sobre el MC, aproximadamente a 5 m del suelo, se instaló una estación meteorológica HOBO Onset S-WCA-M003, compuesta de termo-higrómetro, piranómetro y anemómetro. Internamente, la temperatura fue monitoreada por sensores de la marca Novus, modelo TagTemp Stick, acoplados a un soporte de madera. El equipo se colocó a 0,10 m, 0,60 m, 1,10 m y 1,70 m, según lo recomendado por ISO 7726/1998 (6) para mediciones de temperatura ambiente con ocupantes sentados o de pie. Además, se monitorizó la temperatura del globo a 1,10 m del suelo.

Se presentan dos gráficos, para el día más caluroso de la serie de verano y para el día más frío de la serie de invierno, respectivamente (Figuras 3 y 4). Los gráficos se refieren solo al MC, ya que la comparación térmica no mostró diferencias significativas entre MC y ME.

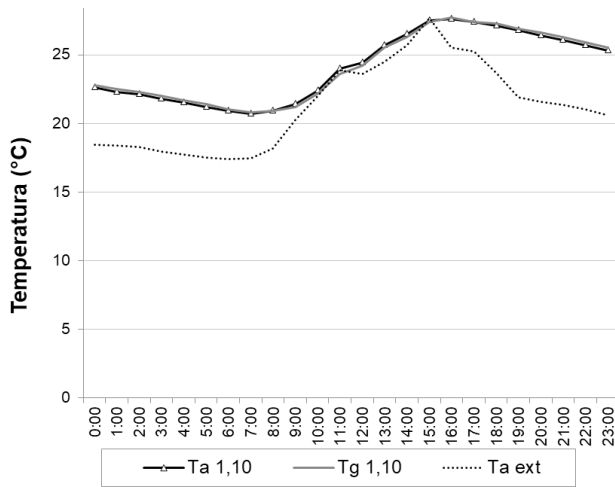


Figura 3. Temperatura del aire y de globo –verano

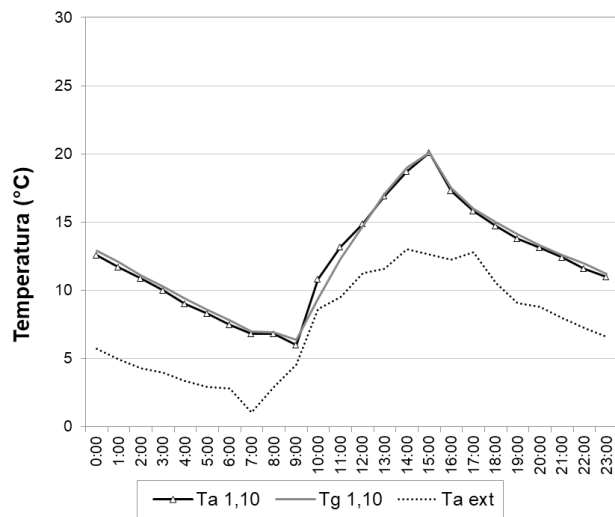


Figura 4. Temperatura de aire y de globo -invierno

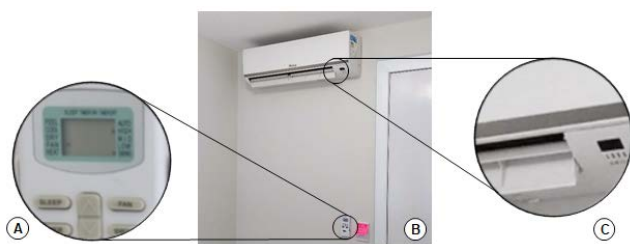


Figura 5. Aire acondicionado: (A) control remoto; (B) vista general; (C) aletas

MC muestra una buena capacidad para amortiguar las caídas de temperatura por la noche, debido al aislamiento térmico de la envoltura. Sin embargo, no hay un efecto significativo de almacenamiento térmico: en los dos días extremos, el factor decremental fue superior a 0.6. Debido a la menor altura solar en invierno, las ganancias por la incidencia solar directa provocan el calentamiento del ambiente durante el día. En el verano, debido a la latitud local, las ganancias directas a través de la ventana Norte se reducen. La temperatura del aire y del globo está muy cerca en las mediciones.

En cuanto al desempeño térmico según las normas brasileñas, para el invierno, la temperatura mínima del aire registrada a 1,10 m del suelo en los módulos fue aproximadamente 4 °C mayor a la temperatura mínima registrada en el exterior, alcanzando el rendimiento mínimo 'M' (mínimo) por NBR 15575-1. Si se consideran los valores máximos diarios, en el día de verano, MC todavía está en el nivel 'M', pero en su límite superior (con  $T_{i,max} > T_{e,max}$ ). Por lo tanto, se concluye que, incluso prestando atención a las recomendaciones normativas para la envolvente, el ambiente tiene un bajo desempeño térmico.

### 2.3. Evaluación del Desempeño del Sistema de Climatización

Cada módulo (MC y ME) está equipado con un aire acondicionado tipo "split" de la marca Philco, modelo PH9000TQFM5, ciclo frío y calor (de 16 °C a 31 °C), capacidad de 9,000 BTU/h (2.64 kW), flujo de aire de 500 m³/h - Figura 5 (A, B y C). La evaluación del rendimiento del sistema HVAC buscó verificar la estabilidad térmica en funcionamiento y el tiempo de respuesta del dispositivo de CA.

Las pruebas se realizaron durante el día (6 am - 6 pm), adoptando 16 °C para TMÍN y 30 °C para TMÁX, de la siguiente manera:

- 27.09.2018: mantenimiento de TMÍN
- 10.10.2018: mantenimiento de TMÁX

Los sensores de temperatura se instalaron de acuerdo con la recomendación de ISO 7726/1998 (6) para mediciones a tres alturas. El soporte del sensor se colocó en el centro de la habitación, con la ventana hacia el norte y la persiana cerrada. El comportamiento térmico fue equivalente en MC y ME, en todos los protocolos de operación de aire acondicionado. La desviación en las medi-

ciones en MC y ME fue del orden de  $\pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ , lo que se puede atribuir a la precisión de los sensores utilizados en las pruebas. Este hallazgo es relevante para futuros estudios comparativos, lo que nos permite suponer que el MC y el ME son térmicamente equivalentes incluso en términos de control térmico. Solo los resultados obtenidos en el MC se presentan a continuación.

La prueba de mantenimiento de TMÍN (Figura 6) indica que las temperaturas internas tardaron aproximadamente seis horas en estabilizarse.

Se descubrió que, aunque se requiere un período de tiempo razonable para alcanzar la temperatura de consigna, el sistema de aire acondicionado de la CBBC aún puede considerarse satisfactorio con respecto a la refrigeración, ya que las temperaturas medidas estaban muy cerca de la referencia de  $16 \text{ }^\circ\text{C}$  (punto de ajuste).

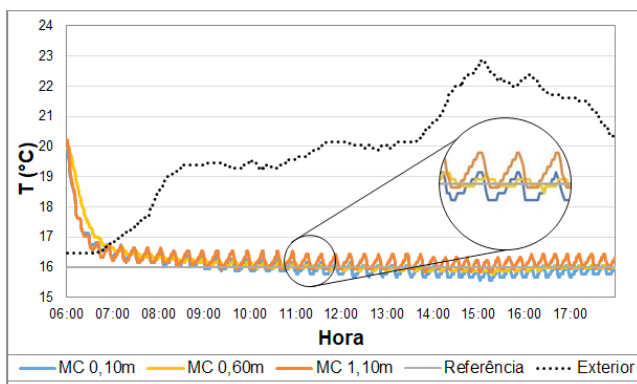


Figura 6. Prueba de mantenimiento de TMÍN

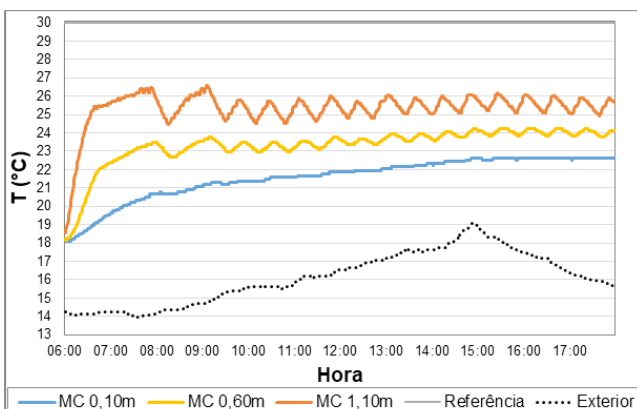


Figura 7. Prueba de mantenimiento de TMÁX

La prueba de mantenimiento de TMÁX (Figura 7) se realizó en un día relativamente frío con baja amplitud térmica durante el período monitoreado. Se observa que el sistema de aire acondicionado de la CBBC tiene mayor dificultad para calentar el ambiente, estabilizándose a una temperatura muy por debajo de la temperatura de consigna. En el intervalo de 3 p.m. a 6 p.m., alcanzó aproximadamente  $23 \text{ }^\circ\text{C}$  a 0,60 m,  $7 \text{ }^\circ\text{C}$  por debajo de la referencia de  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ . Otra cuestión se refiere al tiempo de homogeneización y la ocurrencia de estratificación de temperatura entre mediciones a 0,10 m, 0,60 m y 1,10 m. Según NBR 16401/2008, la diferencia entre la temperatura a 0,10 m (nivel del tobillo) y 1,10 m (nivel de la cabeza de una persona sentada) debe ser inferior a  $3 \text{ }^\circ\text{C}$ . Este parámetro no se cumple en el 77,4% de las mediciones de TA, en la prueba de mantenimiento TMÁX.

## 2.4. Desempeño acústico

En abril de 2018, se realizaron mediciones acústicas en el MC, en diferentes puntos y separados entre sí, de acuerdo con el estándar NBR 10152: 2017.

La fachada de la ventana, orientada hacia el norte, es diagonal al carril de tráfico de vehículos. En cumplimiento con NBR 10151/2000, las mediciones externas se realizaron en puntos ubicados a 1.20 m del piso y 2.00 m de paredes y / o superficies que podrían reflejar ondas de sonido. Se usó un analizador de frecuencia (marca Brüel & Kjaer, modelo B&K 2250 Light clase 1), con un micrófono de tipo campo abierto de  $\frac{1}{2}$ " conectado. Este equipo tiene un rango de medición dinámico de 120 dB (A), un rango de frecuencia de banda ancha de 5Hz a 20kHz y una sensibilidad nominal de circuito abierto de  $50\text{mV} / \text{Pa} \pm 2\text{dB}$  (A).

Las mediciones internas y externas se realizaron con el analizador de frecuencia. El posicionamiento del analizador se muestra en la Figura 8 (a y b). En la medición, se evaluó el aislamiento acústico del MC para el ruido del tráfico, a fin de obtener una referencia de la condición proporcionada por CBBC.

El analizador de frecuencia se ajustó para medir el nivel continuo de presión de sonido ponderado A (NPS) (LAeq), leído en respuesta rápida, según lo definido por NBR 10151/2000. Los valores LAeq se registraron en tres mediciones de 15 minutos, frente a MC.

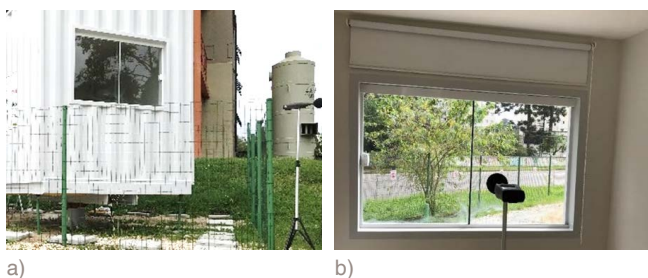


Figura 8. Posición del analizador: (a) área externa; (b) área interior

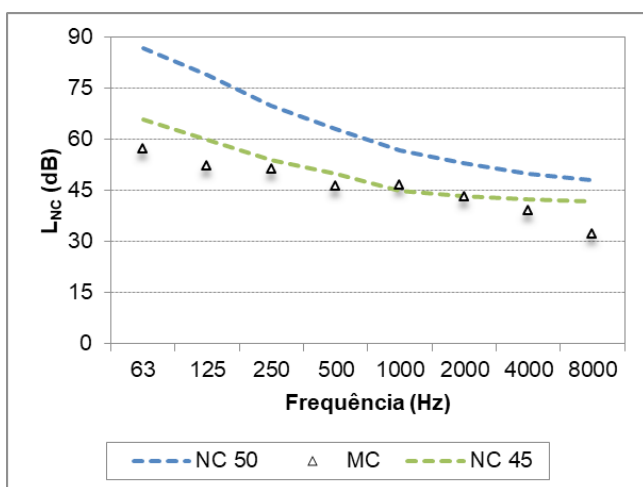


Figura 9. Análisis espectral de la media de mediciones para el MC.

El nivel NC representativo de un entorno (LNC, en dB) consiste en el análisis espectral de las mediciones realizadas, comparándolas con curvas de referencia.

La Figura 9 presenta los resultados para MC, comparándolos con las curvas estandarizadas por NBR 10152/2017. Se observa que, a la frecuencia de referencia de 1000 Hz, MC está dentro de la curva NC 50, pero ligeramente por encima de la curva NC 45, quedando así por encima de lo recomendado por NBR 10152/2017 tanto para oficinas privadas como para oficinas colectivas.

Además, el MC presentó un nivel de presión sonora promedio de 51 dB, superior al recomendado para una oficina privada (40 dB (A)) o una oficina colectiva (45 dB (A)), por lo que no sería un entorno adecuado para estas situaciones

## 2.5. Desempeño lumínico

Los módulos CBBC están equipados con un sistema de iluminación (Philips modelo HUE White and Color Ambiance - Starter Kit E27), que consta de tres lámparas inteligentes y un puente de comunicación. El flujo luminoso (O) varía de 342 lm (TCOR = 2,000 K), 806 lm (TCOR = 4,000 K) a 550 lm (TCOR = 6,500 K). El sistema tiene una producción de 16 millones de colores, 50 mil tonos de blanco (PHILLIPS, 2018), pudiendo reproducir la temperatura de color de cualquier tipo de lámpara.

La evaluación del rendimiento del sistema de iluminación artificial de CBBC se realizó por la noche, para evaluar si el nivel mínimo de iluminación (E) se ajusta a los parámetros de NHO11 (FUNDACENTRO, 2018):

- Actividad de trabajo de oficina, con una tolerancia del 10%:  $E \geq 450$  lux;
- Al menos 70% en la medición punto a punto, en el área de la tarea:  $E \geq 350$  lux;
- Entorno inmediato:  $E \geq 300$  lux.

Se retiraron todos los muebles, excepto la mesa, que estaba centralizada en la habitación. La persiana se selló con cinta adhesiva para minimizar la incidencia de iluminación artificial externa. Teniendo en cuenta las dimensiones reducidas del ambiente y la existencia de un punto de iluminación central, se decidió seguir el protocolo de medición indicado en NBR ISO/CIE 8995/2013, en lugar de NHO11/2013.

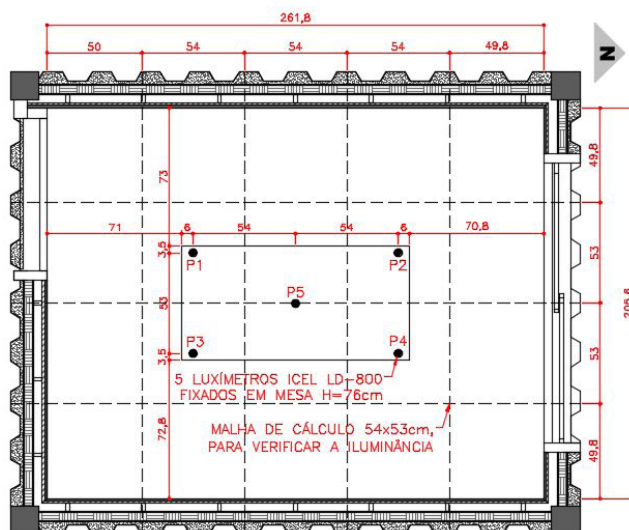


Figura 10. Distribución de luxómetros en la CBBC.

Se utilizaron cinco luxómetros (marca ICEL, modelo LD-800), en la escala de 400 lux, con una resolución de 0.1 lux y una precisión de  $\pm 3\%$ . Se definió una malla (53 cm  $\times$  54 cm), sobre la cual se colocaron los sensores (Figura 10), extrayendo el promedio de E.

En cuanto a los requisitos de iluminancia (E), el valor estandarizado para las aulas es de 300 lux, y para las actividades de oficina, 500 lux (1). El rendimiento del sistema de iluminación en la noche fue insatisfactorio, ya que el valor más alto registrado fue de aproximadamente 220 lux con TCOR de 3.521 K. En este contexto, se alerta de la necesidad de complementar la iluminación de la CBBC en cualquier estudio nocturno.

## 2.6. Renovación de aire en la CBBC

El procedimiento implica monitorear la concentración de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) dentro del módulo y usarlo como un gas indicador para obtener la tasa de renovación del aire en el ambiente (8) (11) (14). La concentración de este gas es un indicador importante del nivel de contaminación producida por los usuarios en ambientes interiores, ya que el metabolismo humano consume oxígeno ( $\text{O}_2$ ) y produce  $\text{CO}_2$  y vapor de agua, eliminados en la respiración con otros efluentes biológicos que causan olores (2).

El monitoreo se realizó en el ambiente con un medidor de  $\text{CO}_2$  modelo Flex X-06 de Criffer, con un rango de medición para la concentración de 0 a 40,000 ppm, calibrado por la fábrica y conectado a un registrador de datos de la misma marca. El MC se mantuvo orientado hacia el norte verdadero, con una persiana abierta y una ventana cerrada. Un voluntario permaneció dentro de ambiente durante el tiempo necesario para producir 2,000 ppm de  $\text{CO}_2$  al respirar. El medidor se colocó sobre la mesa, a 1 m de distancia de la ventana y se configuró para registrar los datos de concentración de  $\text{CO}_2$  cada 5 minutos. Después de que el voluntario se fue, los datos continuaron registrándose hasta que la concentración de gas se estabilizó alrededor de un valor mínimo, teóricamente equivalente a la concentración medida externamente.

Para obtener la tasa de renovación del aire, se utilizó el método de reducción de la concentración de un gas indicador ( $\text{CO}_2$ ), de acuerdo con la metodología definida en la norma ASTM E 741/2006 (3). La tasa de renova-

ción del aire por infiltración obtenida por este método fue de 0,33 renovaciones por hora. Durante esta prueba, era necesario renovar el aire ambiental, ya que el sistema de CA instalado no renueva el aire y la renovación por infiltración es insuficiente para una larga estancia en el medio ambiente. En la prueba realizada, el valor máximo permitido para la calidad del aire interior - 700 ppm por encima de la concentración externa (2) - se alcanzó después de 45 minutos de permanencia en el ambiente.

### 3. Conclusiones

La Cámara Bioclimática de bajo costo es un instrumento sin precedentes en Brasil, y puede convertirse en una herramienta para promover la enseñanza, la investigación y el desarrollo tecnológico del confort ambiental, en estudios de adaptación constructiva frente a la diversidad climática brasileña.

En este contexto, vale la pena mencionar otras investigaciones realizadas, como el estudio de la percepción de confort en el ambiente construido de la CBBC (16) y el modelo de simulación con EnergyPlus para replicar la CBBC en otras zonas bioclimáticas brasileñas (13).

Las pruebas de desempeño realizadas apuntan a algunas debilidades que deben abordarse en futuras mejoras. En este momento se están llevando a cabo algunas iniciativas de mejora, a saber: 1) colocación de nueva ventana con nuevo marco + vidrio, para aumentar el aislamiento acústico del entorno; 2) estudio de un sistema pasivo de climatización basado en enfriamiento radiante nocturno y calentamiento solar diurno con la introducción en el espacio de un dispositivo radiante-capacitivo; 3) introducción de un sistema automatizado de renovación de aire basado en el nivel de concentración de CO<sub>2</sub>.

### 4. Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico (CNPq), por las becas y asistencia financiera para el proyecto de investigación. A Delta Containers, por el suministro y ejecución de la CBBC, y a Eternit, LP Brasil, Pado, Philco Eletrônicos S.A. y Placo Saint-Gobain, por las donaciones de dispositivos y suministros.

## 5. Bibliografia

- (1) ABNT (2003). NBR 15.220: Desempenho térmico de edificações. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).
- (2) ABNT (2008). NBR 16.401: Instalações de ar –condicionado: Sistemas centrais e unitários. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).
- (3) ASTM (2006). E 741-00 – Standard test method for determining air change in a single zone by means of a tracer gas dilution. American Society for Testing and Materials (ASTM).
- (4) Brasche, S., Bischof, W. (2005). Daily time spent indoors in German homes –baseline data for the assessment of indoor exposure of German occupants. *International journal of hygiene and environmental health*, 208(4), 247-253.
- (5) Buges, N. L., Stumpo, L. F. A., Porto, F. H. F. S., López, V., Andreasi, W. A. (2014). A eficiência energética de contêiner adaptado como residência nos diversos climas do Brasil. In: XV Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Maceió: EN-TAC.
- (6) Carvalhais, C. A. A. (2011). Contribuição para o estudo da tolerância humana a ambientes térmicos extremos: ensaios de validação de câmara climática (Dissertação). Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- (7) ISO (1998). ISO 7726 – Ergonomics of the thermal environment: instruments for measuring physical quantities. International Standard Organization (ISO).
- (8) Lanzinha, J. C., Pinto, M., Freire, T., Alves, A. (2015). Qualidade do ambiente interior em lares e jardins de infância na cidade de Covilhã: Estudo exploratório. International Conference on Engineering UBI, Covilhã: UBI.
- (9) Peel, M. C., Finlayson, B. L., McMahon, T. A. (2007). Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 11(5), 1633-1644.
- (10) Pérez-Lombard, L., Ortiz, J., Pout, C. (2008). A review on buildings energy consumption information. *Energy and Buildings*, 40, 394-398.
- (11) Pinto, A., Silva, F. Mamede, M. (2012). Avaliação experimental da permeabilidade de ar da envolvente e do sistema de ventilação – Edifício “Gaioleiro” (1889): Contributos para uma reabilitação sustentável. Conferência Nacional iSBE, Lisboa.
- (12) PROCEL (2013). Manual para Aplicação do RTQ-C. Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL).
- (13) Ribeiro, D. A. (2019). Diretrizes Para a Replicação da Câmara Bioclimática de Baixo Custo nas Zonas Bioclimáticas Brasileiras (Dissertação). Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
- (14) Santos, J. P. (2008) Avaliação experimental dos níveis de qualidade do ar interior em quartos de dormir: Um caso de estudo (Dissertação). Faculdade de Ciências e Tecnologia da universidade Nova de Lisboa.
- (15) Trevisan, L. Y. I., Tamura, C. A., Ribeiro, D. A., Gomes, B. L. M., Drach, P. R. C., Hara, M. M., Krüger, E. (2018). Construção de Câmara Bioclimática de Baixo Custo para estudos de ambiência térmica no Brasil. In: XVII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Foz do Iguaçu: ANTAC
- (16) Trevisan, L. Y. I. (2019). Concepção, construção e verificação da aplicabilidade de uma Câmara Bioclimática de Baixo Custo em estudos de conforto ambiental (Tese). Universidade Tecnológica Federal do Paraná.



# Conversión fotovoltaica para aire acondicionado en Madrid

IETCC. CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS (CSIC)

M. Izquierdo (1), T. Cerdo (2)

(1) Científico Ad Honorem. Instituto de ciencias de la construcción Eduardo Torroja (IETcc-CSIC), Madrid (España).  
Ad honorem researcher. Eduardo Torroja Institute for construction sciences, Madrid (Spain).

(2) Personal de investigación. Instituto de ciencias de la construcción Eduardo Torroja (IETcc-CSIC), Madrid (España).  
Researcher. Eduardo Torroja Institute for construction sciences, Madrid (Spain).

Persona de contacto/Corresponding author:

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1251-4693> (T. Cerdo)

## Conversión fotovoltaica para aire acondicionado en Madrid

### RESUMEN

La industria fotovoltaica tiene gran potencial en la climatización de edificios, según los objetivos H2030. El objetivo de este trabajo es divulgar resultados experimentales de un generador fotovoltaico, con 16 módulos y rendimiento nominal de 15%, alimentando una bomba de calor aire-agua de 5kW, para climatizar un laboratorio de 35 m<sup>2</sup> y UA = 150 W/K. Este genera electricidad, del regulador a dos baterías de 250 Ah, hasta el inversor, para alimentar la bomba de calor. Los resultados del sistema fotovoltaico-térmico en micro-red, corresponden al verano de 2013, y dos días claros tipo. Parámetros monitorizados: temperatura exterior de bulbo seco (9,9°C-39,5°C); energía solar interceptada, (91,2 kWh/día-145,2 kWh/día); rendimiento diario del generador (5%- 10%) y producción frigorífica (15 kWh/día-28,4 kWh/día). El CEE de estos días fue 3,3 y 3,6, y el CEE estacional, 2,8. Se discuten resultados y conclusiones sobre los efectos dinámicos asociados a la variación energética solar interceptada.

**Palabras clave:** solar fotovoltaica; refrigeración solar; micro-red; reducción de emisiones; edificios; vivienda.

## Photovoltaic conversion for air conditioning in Madrid

### ABSTRACT

*The photovoltaic industry offers great potential on buildings air conditioning, according to H2030 objectives. The aim of this work is to disclose experimental results of a photovoltaic generator, with 16 modules and nominal efficiency of 15%, supplying a 5kW air-water heat pump, for refrigerating a 35 m<sup>2</sup> laboratory with UA = 150 W / K. This generates electricity, from the regulator through two 250 Ah batteries and the inverter, to power the heat pump. Results of the photovoltaic-thermal system in micro-net, corresponds to summer 2013, and two clear type days. Monitored parameters: dry bulb outdoor temperature (9.9°C-39.5°C); intercepted solar energy, (91.2 kWh / day-145.2 kWh / day); daily generator output (5% - 10%) and refrigeration production (15 kWh / day-28.4 kWh / day). CEE of these days was 3.3 and 3.6, and seasonal CEE, 2.8. Results and conclusions are obtained on the dynamic effects associated with intercepted solar energy variation.*

**Keywords:** solar photovoltaics; solar refrigeration; micro-net; emission reduction; buildings; housing.

# 1. Introducción

Actualmente existen diferentes políticas, planes estratégicos e incentivos en toda Europa [1] surgidos a raíz de la crisis energética en la Unión Europea. Entre ellos destaca especialmente el denominado Horizonte 2030, que supone un apoyo decisivo para la transición energética en sectores como la Edificación. Parte de los objetivos fijados por el H2030 en el Marco sobre Clima y Energía, establecen alcanzar hasta un 40% en la reducción de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), y un consumo de al menos el 32% de la energía, procedente de fuentes renovables [2]. Por su parte, el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030 (PNIEC), actualizado a 20 de enero de 2020, propone como objetivo nacional para 2030, hasta un 42% de renovables sobre el uso final de la energía respecto a 1990 [3].

A nivel nacional, en mayo de 2020 se lleva a las Cortes Españolas el primer Proyecto de Ley de Cambio Climático y Transición Energética para alcanzar la neutralidad de emisiones en 2050, como fecha máxima [4]. En este momento se han aprobado propuestas de ayudas a la inversión en instalaciones de producción de energía -térmica y eléctrica- con fuentes renovables, susceptibles de ser cofinanciadas con fondos comunitarios FEDER) [5].

Ante el gran reto de la Transición Ecológica la energía fotovoltaica se postula como una energía alternativa, limpia, distribuida y renovable para alcanzar los objetivos establecidos a nivel global. La energía solar fotovoltaica constituye actualmente una industria de gran potencial, en constante expansión a nivel mundial, con una tasa crecimiento anual compuesto de componentes de instalaciones del 36,8% entre 2010 y 2018, siendo un 12,8% en el último año [6]. Presenta importantes ventajas, entre las que se encuentran la fiabilidad del sistema y el bajo coste de operación y mantenimiento, siendo un tipo de energía con generación en periodos de máxima demanda [7].

Según el informe realizado por el Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems (ISE), a finales de 2019, en toda Europa existía un total de mercado de fotovoltaica de 8 GW, con 119 GW de instalación acumulada, un consumo de potencia de fotovoltaica de 127 TWh, ocupando una cuota de electricidad del 3,9 % (bruto) [6].

Técnicamente, la industria fotovoltaica se ha potenciado, especialmente en Asia, con un aumento importante de la capacidad de fabricación, distribución e instalación de estos sistemas. A pesar de sus inconvenientes iniciales con respecto al coste de producción de las células, el precio medio del módulo fotovoltaico ha descendido de manera muy significativa en los últimos años, lo que ha permitido aumentar su rentabilidad.

Por otro lado, a medida que el coste de los módulos fotovoltaicos ha ido disminuyendo, el rendimiento de los mismos ha ido creciendo [8], fomentando actividades como el autoconsumo y el balance neto, que están regulados. En el caso de que el proceso implique la transferencia de electricidad a la red, las medidas actuales proponen que el consumidor pague el coste y la gestión asociados al uso del sistema eléctrico. El módulo fotovoltaico ha disminuido 11,8 veces su precio desde 2007, y sigue con tendencia a la baja.



Figura 1. Evolución del precio del módulo fotovoltaico (2007-2019). Fuente: ANPIER.

Este trabajo se ha llevado a cabo en la Planta Experimental de Energía Solar del IETCC en La Poveda, Arganda del Rey, Madrid. Los resultados de este estudio se obtuvieron en el periodo 2012 y 2013, fruto del Proyecto de Investigación: Diseño, construcción y evaluación experimental de un sistema de refrigeración solar y trigeneración de alta eficiencia para edificios e invernaderos (ENE2010-20650-CO2-01), cuyos objetivos eran:

- a) Sustituir refrigerantes fluorados utilizados en sistemas de climatización convencional de pequeña potencia (3kW-15kW) por máquinas de refrigeración por absorción bromuro de litio aire-agua y aire-aire.

b) Comparar desde el punto de vista energético los sistemas de absorción alimentados por calor solar (conversión térmica), con los sistemas de compresión mecánica de vapor activados por electricidad fotovoltaica [9].

Este trabajo, sobre energía fotovoltaica, presenta un sistema diseñado para responder a la demanda de frío [10], o de calor [11], y climatizar un edificio prototipo o laboratorio ocupado. Este edificio cuenta con un área total de 35 m<sup>2</sup> (equivalente al 40% de la vivienda media española). Su diseño tiene por objeto la autonomía funcional mientras haya producción eléctrica fotovoltaica, sin exportarla a red, como micro-red, que solo abastece a este edificio. Si la instalación no generase toda la demanda precisada de frío o calor, el sistema se desconectaría, conectándose la máquina frigorífica a la red.

Seguidamente se detallan las características de la instalación, los resultados experimentales correspondientes al verano de 2012, y los obtenidos en el verano de 2013. Tras esto, se expresa brevemente la evaluación de impacto ambiental de este sistema fotovoltaico-máquina frigorífica.

## 2. El sistema

El sistema se compone del laboratorio o edificio piloto a climatizar, el campo de paneles fotovoltaicos con sistema de almacenamiento en baterías, una estación meteorológica, la bomba de calor convencional, y el suelo radiante.

### 2.1. El edificio

El edificio, destinado a oficinas, es un laboratorio o prototipo utilizado para el estudio de sistemas de climatización frío/calor, para lo que se utiliza electricidad proveniente de una instalación fotovoltaica como principal fuente de energía.

El laboratorio cuenta en su interior con dos estancias. Una de ellas se reserva al sistema de almacenamiento, al inversor, al controlador de carga para seguimiento del punto de potencia máximo (MPPT), y al sistema de medida y control. En el otro espacio se ubica el área de despachos, la cual estuvo ocupada durante el estudio por tres personas. El laboratorio se

mandó construir según los requisitos establecidos en el Código Técnico de la Edificación (CTE), en su versión de 2013, estableciéndose una transmitancia térmica en régimen estacionario  $UA = 150 \text{ W/K}$ , y una demanda térmica máxima, también en régimen estacionario, de 3,5 kW, la cual podía alcanzar 5 kW al comienzo del proceso de refrigeración, cuando la inercia térmica del edificio es más relevante.



Figura 2. Campo fotovoltaico y laboratorio.

### 2.2. El campo fotovoltaico

Dieciséis módulos componen el campo fotovoltaico, con una superficie total de 21 m<sup>2</sup>, y un área útil de 16 m<sup>2</sup>. Los módulos cuentan con 48 células de silicio policristalino cada uno, de dimensiones 0,156 x 0,156 m, potencia pico nominal de 180 W en condiciones estándar, y una potencia nominal total de 2,88 kW. Los módulos tienen una inclinación con respecto a la horizontal de 40°. La conexión entre los paneles permite una generación de corriente continua (CC) con una salida de 48 V de diferencia de potencial. La electricidad parte desde el regulador MPPT a dos baterías de 250 Ah. Este regulador MPPT controla la operación del campo fotovoltaico, alimentando con electricidad al sistema de almacenamiento. El inversor, con salida máxima de 3,0 kW, convierte la CC en Corriente Alterna (CA), con la que alimenta a la bomba de calor.

### 2.3. Estación meteorológica: variables ambientales

Los parámetros medidos por la estación meteorológica son: temperaturas exteriores de bulbo seco y de bulbo húmedo, humedad relativa, radiación solar, velocidad del viento, entre otros. Estas se miden cada ocho segundos, registrándose los valores medios cada 10 minutos. Estos valores son determinantes tanto en cálculos experimentales como en modelos teóricos. Para este proceso estudiado, las variables meteorológicas fueron la temperatura exterior de bulbo seco y la radiación solar sobre el campo fotovoltaico.

### 2.4. La bomba de calor

La máquina utilizada es una enfriadora de agua de compresión mecánica de vapor, reversible, condensada por aire, con capacidad de frío-calor, de 5-6 kW. El refrigerante utilizado es R410A, cuyo Potencial de Efecto Invernadero Directo (PEID), 20 años vista, es de 4.200 kg equivalentes de CO<sub>2</sub>. Utiliza el agua como refrigerante secundario, por lo que forma un sistema indirecto.

Tanto para frío como para calor, el refrigerante secundario circula bajo el suelo radiante en bucle cerrado. En verano, extrae el calor de las estancias hasta evaporador de la máquina frigorífica, en el exterior, Figura 3, donde se intercambia al aire exterior, utilizando el condensador. El condensador se encarga de transferir el calor del edificio, gracias a la electricidad suministrada tanto al compresor como a los equipos auxiliares, hasta el aire exterior.



Figura 3. Bomba de calor reversible aire-agua.

### 2.5. El suelo radiante para frío/calor

El suelo radiante cuenta con un área útil de 28 m<sup>2</sup> ( $U=7,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ ). Dos circuitos lo alimentan, a fin de abastecer calor o frío a cada una de las estancias del edificio. La Figura 4 muestra la composición por capas del suelo radiante. En primer lugar se coloca una placa de poliestireno expandido de baja conductividad térmica, cuya función es aislar el suelo radiante del suelo exterior. Sobre esta capa se aplica un plástico flexible sobre el que se ubican los espaciadores para correcta distribución de las tuberías del suelo radiante. Sobre ellas, se coloca una capa de poliestireno de alto impacto.

Se ha utilizado una tubería de polietileno de alta densidad (HDPE) para distribuir el fluido térmico. Su diámetro externo/interno es de 0,020/0,016 m respectivamente. Para optimizar la eficiencia de la bomba de calor, y obtener el coeficiente óptimo de transferencia de calor, se estableció una separación entre tubos de 0,15 m, según la normativa UNE-EN 1264. Sobre el sistema radiante se instala un piso, compuesto por una capa de mortero de 0,05 m de espesor y una solería de 0,02 m, colocada sobre una capa gruesa de adhesivo que la une con el mortero. Adicionalmente, como medida de aislamiento de la base, se ubica en todo el perímetro una capa de aislamiento de 0,02 m de espesor. Para unir esta capa perimetral aislante y la base, se interpone una junta elástica. Así, el suelo radiante también actúa como subsistema de almacenamiento diario de frío o de calor.

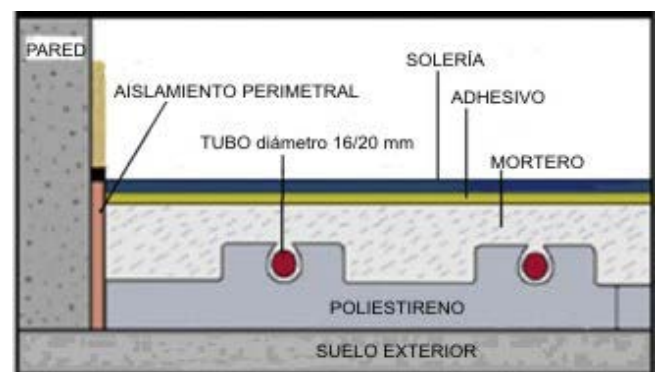


Figura 4. Esquema del suelo radiante.

## 2.6. Diagrama simplificado del sistema de refrigeración

Este trabajo no ha considerado la producción de electricidad fotovoltaica para alumbrado o para el uso de otros equipos.

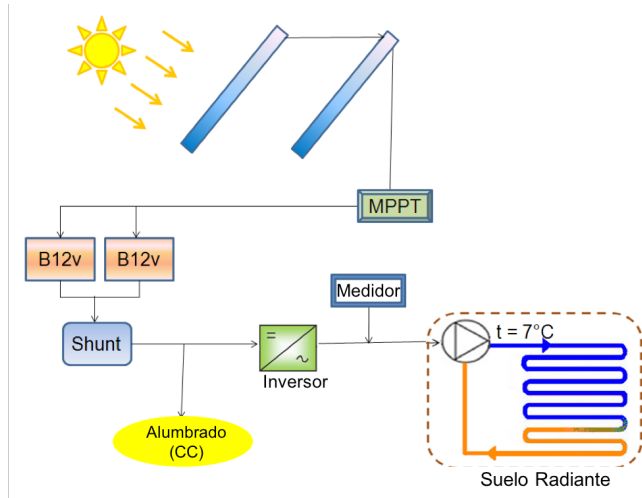


Figura 5. El sistema.

## 3. Resultados experimentales de dos días característicos

El campo de módulos intercepta radiación solar para dos días de verano de 2012, según indica la Figura 6.

Análogamente, se muestra la distribución de temperaturas exteriores en la Figura 7.

### 3.1. Resultados experimentales del 28 de agosto

La Figura 8 refleja la electricidad producida que arranca el campo fotovoltaico, y cómo se almacena sobre las 07:30 horas. La generación aún no es alta, y la diferencia de potencial tiene su valor mínimo a las 9:30, de 23,5 V. Se observa un aumento rápido de la potencia generada, registrando un máximo de 1.700 W entre las 11:30 y 12:30 horas. La diferencia de potencial en las baterías, inicialmente de 23,5V, se incrementa hasta estabilizarse en 28 V desde las 12:30 hasta las 18:00 horas. En este periodo, con las baterías cargadas, estas no admiten la máxima potencia generada (1.700 W) por lo que se reduce la absorción de electricidad en ellas, ajustándose a la electricidad que alimenta al inversor, de 1.100 W a las 14:00 horas, valor que se mantiene constante hasta las 18:00 horas. En ese momento, la radiación solar comienza a disminuir, junto a la generación de electricidad, hasta llegar a 0 W sobre las 20:30 horas. La diferencia de potencial baja a 24 V, manteniéndose en torno a ese valor cuando el inversor no recibe ya electricidad del sistema [10].

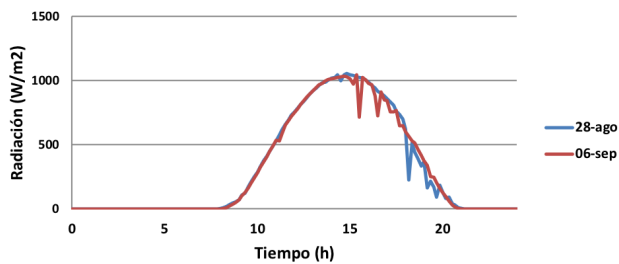


Figura 6. Radiación solar interceptada por el campo de módulos.

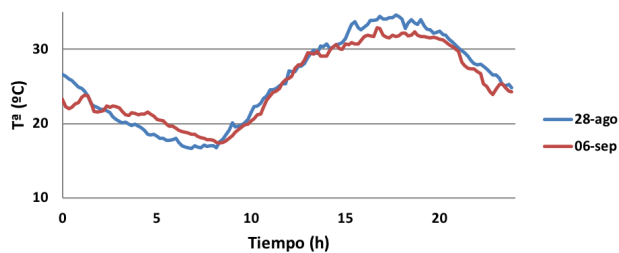


Figura 7. Temperatura exterior de bulbo seco.

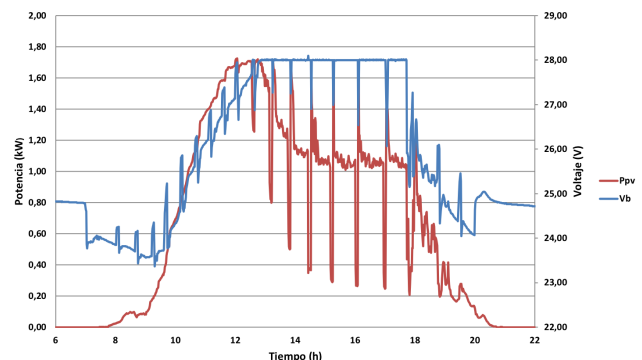


Figura 8. Energía eléctrica generada y voltaje (28.08.2012).

La Figura 9 muestra la electricidad (CA) suministrada a la máquina frigorífica y la potencia frigorífica que esta produce. A las 7:30 horas la bomba de calor recibe una potencia de 800 W, aproximadamente. A las 9:30 esta potencia disminuye hasta los 400 W, agotando la electricidad almacenada. La razón obedece a que hasta este momento la electricidad generada por el campo fotovoltaico es nula, mientras que la bomba de calor recibe la electricidad procedente de la almacenada en las baterías durante el día anterior.

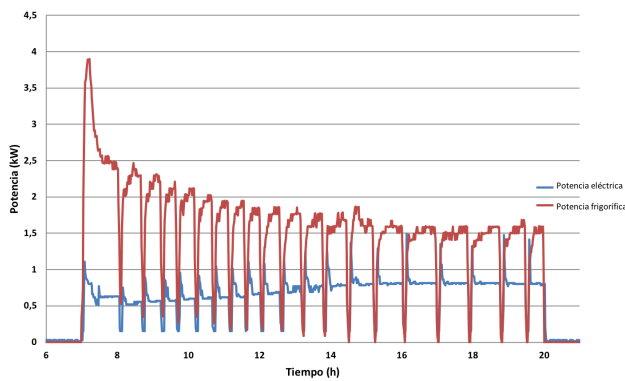


Figura 9. Potencia absorbida por la bomba de calor y potencia frigorífica.

A partir de las 10:00 horas, Figura 8, la electricidad generada supera a la suministrada por la bomba de calor. Comienzan a cargarse las baterías, hasta las 13:30 horas que alcanzan su valor máximo. Simultáneamente alimentan a la bomba de calor, Figura 9, alcanzando el voltaje máximo, 28 V.

Para el arranque, la bomba de calor absorbe 1.200 W, produciendo una potencia frigorífica de 3.900 W, Figura 9. Entre las 07:00-08:00 horas disminuye la potencia absorbida hasta 500 W, y la potencia frigorífica hasta 2.400 W.

Durante la mañana (08:00-15:00h) la potencia absorbida crece progresivamente hasta alcanzar un valor máximo de 800 W, que se estabiliza hasta las 20 horas. La potencia frigorífica decrece de 2.400 W a 1.500 W.

A partir de este momento, el control del comportamiento del sistema en este periodo, lo tiene la inercia térmica tanto del suelo radiante como del edificio, puesto que entre las 20:00 y las 07:00 horas del día anterior,

no se encontraba expuesto a la radiación solar, ni a valores altos de temperatura exterior.

El parámetro de la eficiencia energética (CEE) se presenta en la Figura 10. Durante el arranque, estando el suelo radiante caliente, la transferencia de calor y la eficiencia son máximas, por lo que el CEE=5 sobre las 07:30 horas. A partir de este momento, el CEE disminuye hasta un valor de CEE = 2 entre las 14:00 y las 20:00 horas.

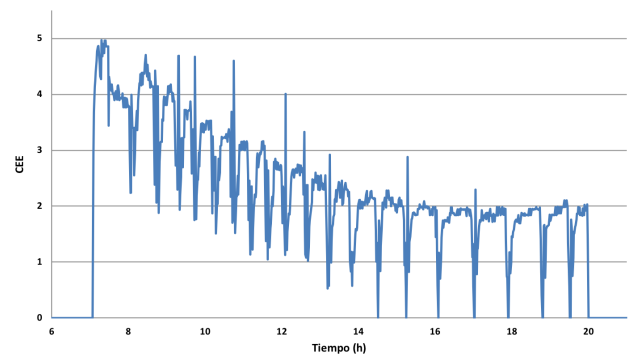


Figura 10. Coeficiente de Eficiencia Energética (CEE).

El resultado de estos procesos se muestra en la Figura 11, representando la variación de la temperatura interior. Esta, a las 07:00 horas, tiene un valor de 26°C, que disminuye hasta 25,5°C a las 08:30 horas, al inicio del horario laboral. Entre las 08:30 y las 10:00 horas la temperatura sigue bajando hasta los 23°C [10].

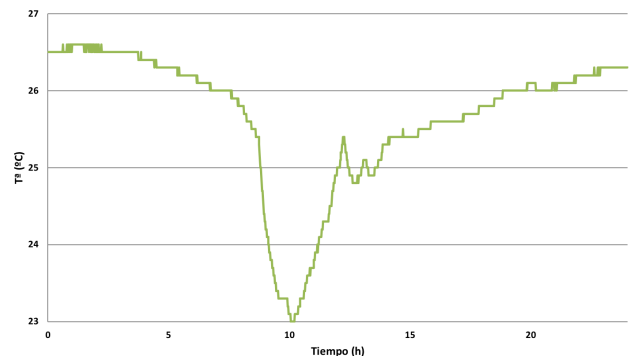


Figura 11. Temperatura interior.

Las razones son: por un lado, la electricidad suministrada por las baterías a la bomba de calor, para generar agua fría a 7°C, circulante a través del suelo radiante para enfriarlo, y refrigerar el edificio. Además, con la llegada del personal, se suele ventilar las estancias abriendo las ventanas, para extraer, entre otros, los vapores acumulados de las baterías durante la noche. El aire exterior a 17,5°C, entra en el edificio, Figura 8, contribuyendo a su enfriamiento (free cooling), hasta los 25,5°C-26°C. Una vez cerradas las ventanas, la temperatura desciende hasta 23°C sobre las 10 horas, con una temperatura exterior de 20°C. A esta hora la temperatura interior comienza cierto aumento hasta 25,3 °C a las 12 horas (temperatura exterior 26°C). A las 17:00 horas la temperatura exterior es 34°C y la interior de unos 25,5°C, alcanzando 26°C a las 20:00 horas, siendo la temperatura exterior era de unos 32°C. Desde las 7:00 hasta las 20 horas la temperatura se mantiene en torno o bajo los 25°C, según normativa [12].

### 3.2. Resultados experimentales del 6 de septiembre

En las figuras 12 a 15, se muestra el comportamiento del sistema, como experimento de comprobación.

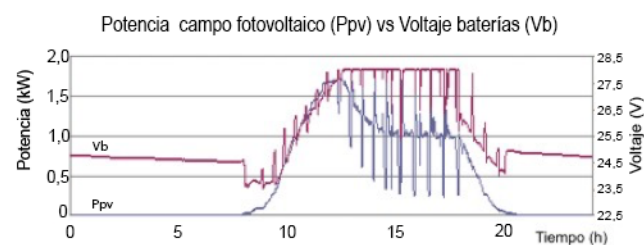


Figura 12. Energía eléctrica generada y voltaje (06.09.2012).

El comportamiento correspondiente a la potencia generada y a la diferencia de potencial en las baterías siguen el patrón del día anterior. En la Figura 13 se observa el alcance de valor máximo de la potencia, 4.000 W, en el arranque, decreciendo hasta 1.750 W a las 20 horas, con el fin de operación. La potencia eléctrica absorbida (CA) por la máquina frigorífica arranca en 1.000 W, disminuyendo rápidamente hasta 500 W, por el agotamiento de las baterías. Tras esto, aumenta a los 800 W, finalizando el experimento.

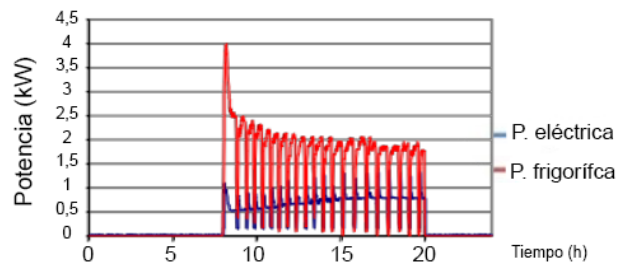


Figura 13. Potencia absorbida por la bomba de calor y potencia frigorífica

Según la Figura 14, destacan los valores de CEE de trabajo de la bomba de calor en arranque, 4, y parada, sobre 2,2.

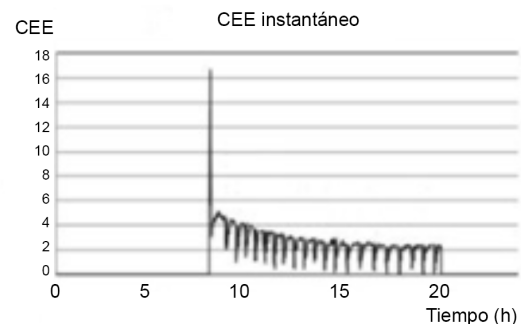


Figura 14. Coeficiente de Eficiencia Energética (CEE).

La Figura 15 muestra las temperaturas exterior e interior.

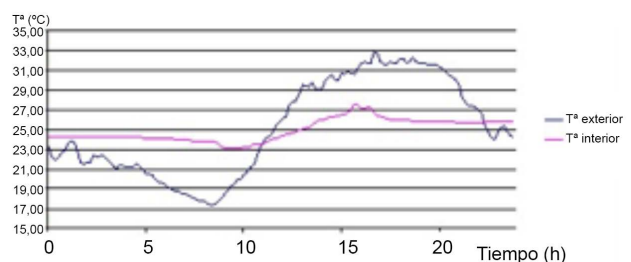


Figura 15. Temperatura exterior e interior.

Los valores de las temperaturas a las 10:00 son: exterior 21°C e interior 23°C. La exterior aumenta hasta alcanzar 30°C a las 15 horas, mientras la interior está a unos 26,5°C. A las 16:00 horas se alcanza los 33°C exteriores, y unos 27°C interiores. Al finalizar la jornada laboral, y por la bajada de la temperatura exterior, la temperatura interior desciende.



## 4. Resultados del verano de 2013

La Figura 16 muestra la distribución de temperaturas exteriores de bulbo seco máxima y mínima, durante el verano de 2013. El 2 de agosto se alcanzó la máxima, de 39,5°C.

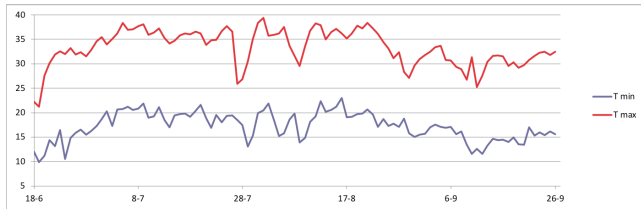


Figura 16. Variación de temperaturas máxima y mínima (verano 2013).

En la Figura 17, se representan la energía solar interceptada por el campo fotovoltaico y la electricidad producida. La Figura 18, refleja el rendimiento del campo fotovoltaico, según Izquierdo [12].

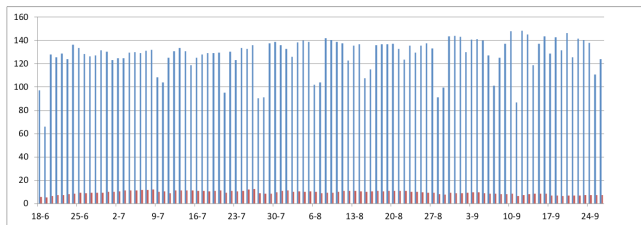


Figura 17. Energía solar diaria interceptada y electricidad generada (CC).

Algunos valores de energía solar interceptada, fueron: 128,2 kWh el 26 de junio; 103,8 kWh el 10 de julio; 133,6 el 13 de julio; 122,6 el 12 de agosto; 123,6 el 22 de agosto; 91,2 el 28 de agosto; 130,1 el 2 de septiembre; 145,2 el 13 de septiembre y 124 kWh el 26 de septiembre.

La energía eléctrica generada como corriente continua en estos días, fue variable: arranca en 5,3 kWh el día 18/6, aumenta hasta 7,9 kWh el día 26 de junio; 10,4 kWh el 10 de julio; 11,4 kWh el 13 de julio; 12,5 kWh el 26 de julio; 10,9 el 12 de agosto; 11 kWh el 22 de agosto; 8,1 el 28 de agosto; 9 el 2 de septiembre; 7,9 el 13 de septiembre; 7,4 kWh el 26 de septiembre cuando finalizó el experimento.

Por lo tanto, los valores obtenidos para el rendimiento diario de la conversión a CC, serán: 7,9/128,2 = 6,16% el día 26/6; 10,4/103,8 = 10,0% el 10 de julio; 11,4/133,6 = 8,5% el 13 de julio; 12,5/135,8 = 9,2% el 26 de julio; 10,9/122,6 = 8,9% el 12 de agosto; 11/123,6 = 8,9% el 22 de agosto; 8,1/91,2 = 8,9% el 28 de agosto; 9/130,1 = 6,9% el 2 de septiembre; 7,9/145,2 = 5,4% el 13 de septiembre y 7,4/124 = 6% el 26 de septiembre. Estos resultados se reflejan en la Figura 18.

Según se muestra, el rendimiento aumenta desde mediados de junio, mientras que su valor medio se estabiliza desde primeros de julio hasta mediados de agosto, alcanzando el valor máximo en torno al 10% los días 10 de julio y 8 de agosto. Sobre mediados de agosto, el rendimiento disminuye lentamente, alcanzando el mínimo sobre el 5% desde mediados de septiembre hasta finales de mes, 26/09 [12].

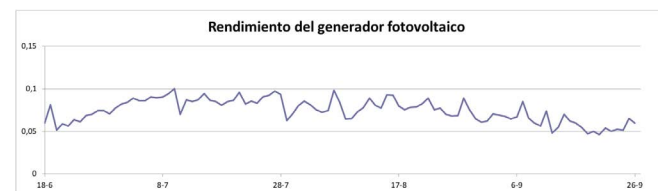


Figura 18. Rendimiento diario del campo fotovoltaico.

Las razones pueden ser: según la Figura 16, las temperaturas máxima y mínima aumentan desde mediados de junio hasta principio de julio, manteniéndose en valores altos hasta mediados de agosto, para descender lentamente hasta últimos de septiembre. Esta variación de la temperatura exterior de bulbo seco genera unas consecuencias:

- Reducción del rendimiento de la célula por el incremento de la temperatura exterior, alcanzando la célula hasta 70°C [8]. Durante cierto periodo, antes y después del mediodía, la célula trabaja 45°C por encima de la temperatura estándar (25°C) de Normalización. Al estar compuesto el módulo por 48 células, si se admite una temperatura media diaria de la célula de 50°C según [8], y una reducción del rendimiento por célula de 0,4% (según características del módulo), la pérdida de rendimiento será (0,4x25x48) del 4,8% del rendimiento nominal, o

sea  $4,8 \times 13,73 / 100 = 0,72\%$  al día. El rendimiento real asociado será, según el rendimiento del módulo,  $13,73 - 0,66 = 13,07\%$ . A esto hay que descontar las pérdidas por: transporte de electricidad, en el controlador, en el sistema de almacenamiento (baterías), y en el inversor [12].

- b) La variación de la demanda de refrigeración del edificio, Figura 16, se incrementa desde mediados de junio hasta primeros de julio por el aumento de la temperatura exterior; permanece casi constante hasta mediados de agosto, y disminuye progresivamente hasta finales de septiembre.
- c) Mientras, la producción eléctrica también experimenta una variación, Figura 17, provocado por las variaciones del ángulo de incidencia y de la duración del día: aumenta desde comienzos de junio hasta principios de julio; se estabiliza hasta mediados de agosto, para posteriormente disminuir hasta finales de septiembre. Sin embargo, la demanda decae más rápidamente, sometida al efecto de la duración del día y al menor soleamiento del edificio. Además, la disminución de la temperatura máxima (de valor medio  $30^{\circ}\text{C}$ ) sugiere una carga térmica menor, por lo que la demanda disminuye.

Si el efecto de la disminución de la demanda es superior al de la disminución de la generación eléctrica del campo de módulos, puede que no sea necesaria parte de la electricidad producida para generar frío, manteniendo cargado más tiempo el sistema de almacenamiento. Así, el campo no genera electricidad pues el almacenamiento no la admite, convirtiéndose parte de esta radiación en calor en el módulo [12].

De la suma de los efectos a) y b), se genera un aumento del rendimiento desde junio hasta mediados de julio, alcanzando un máximo sostenido hasta mediados de agosto, para seguidamente disminuir hasta el 26 de septiembre, Figura 18.

#### 4.1. Producción de frío y eficiencia energética

La Figura 19 representa la electricidad absorbida por el motor del compresor de la máquina frigorífica, como también la absorbida por el motor de la bomba de recirculación del refrigerante secundario, el ventilador y el sistema de control.

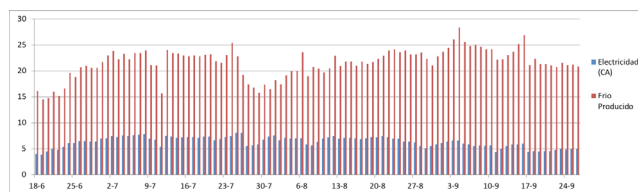


Figura 19. Electricidad diaria suministrada a la máquina frigorífica y frío producido.

El 18 de junio la electricidad absorbida fue 4,0 kWh y el frío producido 16,2 kWh, obteniéndose un  $\text{CEE} = 4,0$ ; la electricidad absorbida crece paulatinamente hasta los 7,1 kWh, dando lugar a 23,0 kWh el 1 de julio, con  $\text{CEE} = 3,28$ . La electricidad generada este día fue 10,1 kWh como CC.

La diferencia entre electricidad generada en corriente continua (5,8 kWh) y la absorbida por la máquina como corriente alterna (4,0 kWh) es 1,8 kWh (31%) para el 18/6. El 1 de julio, la diferencia fue de 3 kWh (30%). El 26/9 la electricidad absorbida fue 4,9 kWh, y el frío producido, de 20,9 kWh, con una eficiencia de la máquina de  $\text{CEE} = 4,25$ , siendo la electricidad generada en CC, de 7,4 kWh, con una diferencia entre la electricidad entre CC y CA de 2,5 kWh. Para el día 4/9, producidos 28,4 kWh y  $\text{CEE} = 4,3$ , la electricidad absorbida fue 6,6 kWh, siendo la CC almacenada 9,6 kWh y la electricidad perdida 3 kWh, más del 30% de la almacenada [12]. Esto confirma una pérdida desigual según el día.

La Figura 20 muestra la variación de la eficiencia energética como resultado de los datos ofrecidos en la Figura 19.



Figura 20. Coeficiente de eficiencia energética.

## 5. Reducción de impacto ambiental

### 5.1. Potencial de Efecto Invernadero Directo

La máquina frigorífica se cargó con 1,7 kg de refrigerante R410 en marzo de 2012. La masa de R410 emitida a la atmósfera hasta abril de 2013, cuando este se pesó, Figura 21, fue de 0,031 kg, aproximadamente el 2% de la carga inicial.

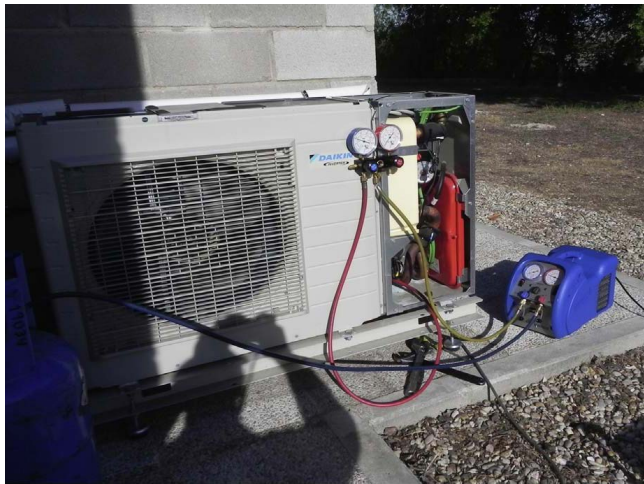


Figura 21. Método para determinar el refrigerante fugado.

Como el Potencial de Efecto Invernadero Directo del R410A es 4.200 kg equivalentes de CO<sub>2</sub>, y sin contar el CO<sub>2</sub> debido a la fabricación del R410A, el CO<sub>2</sub> equivalente emitido en los trece meses fue:  $0,031 \times 4.200 = 130$  kg, Figura 21.

Este dato se obtuvo pesando el refrigerante contenido en la máquina. Pero el trabajo mostrado aquí finalizó tras 5 meses, el 26 de septiembre de 2013. Si se admite un ritmo de fuga sostenido durante este periodo adicional, el R410A emitido a la atmósfera pudo ser  $130 + 0,02 \times 5 / 13 \times 4.200 = 162,3$  kg equivalentes de CO<sub>2</sub>.

### 5.2. Potencial de Efecto Invernadero Indirecto (PEII)

Sin tener en cuenta las emisiones asociadas a la fabricación del módulo fotovoltaico, se puede considerar la electricidad fotovoltaica suministrada a la máquina frigorífica de origen renovable y libre de emisiones de CO<sub>2</sub>. Por lo tanto, la electricidad absorbida no genera emisiones contaminantes. Además, se produce un ahorro

de emisiones respecto a las generadas cuando el suministro procede de la red eléctrica, calculado así:

- El CO<sub>2</sub> emitido en España para producir 1 kWh eléctrico en 2013 fue 0,34 kg CO<sub>2</sub>/kWh.
- De la Figura 19 se obtiene la energía eléctrica absorbida en los 100 días del verano, 700 kWh.

Así, se obtiene un ahorro de 240 kg CO<sub>2</sub>, siendo este el PEII.

En cualquier caso, se puede ver que el uso de la electricidad fotovoltaica para alimentar la máquina frigorífica generó una reducción de emisiones de entre 78 y 110 kg de CO<sub>2</sub>.

## 6. Conclusiones

Durante el año 2012 fue diseñado, construido y evaluado experimentalmente un sistema de refrigeración solar constituido por un generador fotovoltaico de 16 m<sup>2</sup> de área útil y una máquina frigorífica de compresión mecánica de vapor aire-agua de 5 kW de potencia frigorífica. El objetivo fue refrigerar un edificio piloto de 35 m<sup>2</sup> de área total con un suelo radiante. Durante el verano, trabajó en modo refrigeración.

Se presentan los siguientes resultados experimentales de dos días con temperaturas típicas del verano:

- 28/8/2012: Corriente continua generada 12 kWh/día; electricidad suministrada a la máquina frigorífica 9,2 kWh; frío producido, unos 26 kWh; Coeficiente de Eficiencia Energética diario 2,8; caída máxima de temperatura de 26°C a 23°C.

- Los resultados del día 6/9/2012 son similares, con la salvedad del CEE diario que alcanza el valor 3,2.

El experimento se extendió al verano de 2013, destacando los siguientes resultados: rendimiento máximo diario del generador, 10% y medio estacional, 7,5%; electricidad (CA) absorbida por la máquina frigorífica en el verano, en torno a 700 kWh, y frío producido 2.200 kWh, con CEE estacional, 3,1.

La reducción de emisiones, obtenida por diferencia entre PEID y PEII estuvo comprendida entre 70 y 110 kg de CO<sub>2</sub>.

## Agradecimientos

Los autores agradecen al Ministerio de Economía y Competitividad de España la financiación al Proyecto de Investigación: Diseño, construcción y evaluación experimental de un sistema de refrigeración solar y trigeración de alta eficiencia para edificios e invernaderos (ENE2010-20650-CO2-01).

## 7. Bibliografía

- (1) Ferreira, A. et al. (2018). Economic overview of the use and production of photovoltaic solar energy in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81(1), 181-191.
- (2) European Union, *Marco sobre Clima y Energía 2030*. Recuperado de [https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030\\_es](https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030_es) (visto el 04 de mayo de 2020).
- (3) Gobierno de España, (2020): Borrador Actualizado del *Plan Nacional Integrado de energía y clima 2021-2031*. Actualizado a 20 de enero de 2020. (Recuperado de [https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/participacion-publica/pniec\\_2021-2030\\_borradoractualizado\\_tcm30-506491.pdf](https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/participacion-publica/pniec_2021-2030_borradoractualizado_tcm30-506491.pdf) el 04 de mayo de 2020).
- (4) Gobierno de España, Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto demográfico. Recuperado de: [https://www.miteco.gob.es/es/prensa/200519cminproyectedoleycambioclimatico\\_tcm30-509230.pdf](https://www.miteco.gob.es/es/prensa/200519cminproyectedoleycambioclimatico_tcm30-509230.pdf), visto el 20 de mayo de 2020.
- (5) Gobierno de España, Secretaría de Estado de Energía y Ministerio de Transición Ecológica y el Reto Demográfico. *Propuestas de orden de bases para la concesión en concurrencia competitiva ayudas a la inversión en instalaciones de generación de energía térmica/eléctrica con fuentes renovables, susceptibles de ser cofinanciados con fondos Comunitarios FEDER*. (Visto en: <https://energia.gob.es/es-es/Participacion/Paginas/Index.aspx> el 04 de mayo de 2020).
- (6) ©Fraunhofer ISE: *Photovoltaics Report*, updated: 14 November 2019 (Recuperado de: <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf> el 05 de mayo de 2020).
- (7) Gonçalves, P., Sampaio, V., Orestes, M. Y Gonzalez, A. (2017). *Photovoltaic solar energy: Conceptual framework*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74, 590-601. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.081>
- (8) Agustín, P. de (2015). *Photovoltaic self-consumption heating system: analytical model, experimental results and autonomy prospects* (Tesis Doctoral). Universidad Carlos III de Madrid.
- (9) Izquierdo, M. and Agustín, P. de (2015): *Solar heating by radiant floor: Experimental results and emission reduction obtained with a micro photovoltaic-heat pump system*, *Applied Energy* 147, 297-307.
- (10) Izquierdo, M., Agustín, P., Martín, E. (2013): *Heat pump for radiant cooled and heated floor driven by a microphotovoltaic system*. Paper 317. Microgen III, Proceeding of the 3rd edition of the International Conference on Microgeneration and Related Technologies. Naples, Italy, April 15-17. ISBN: 9788890848902.
- (11) Izquierdo, M., Agustín, P., Martín, E. (2014): *A micro photovoltaic-heat pump system for house heating by radiant floor: some experimental results*. *Energy Procedia*, Vol 48, pp 865-875 DOI:10.1016/j.egypro.2014.02.100: Available online at [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com).
- (12) Izquierdo, M. (2016): *Climatización de Edificios con Energía Solar*. Número de asiento registral del derecho de propiedad intelectual 16/2017/3847 de fecha 22/06/2017. Pendiente de impresión.



# GT3

Edificios



onitoRED

## Grupos de investigación

---

INSTITUTO VALENCIANO DE LA EDIFICACIÓN (IVE)  
GENERALITAT VALENCIANA

Monitorización del consumo de energía y ambiente interior en edificios de viviendas. TripleA-reno: rehabilitación energética más Atractiva, Amigable y Asequible basada en el comportamiento real de las viviendas

SCHE-IETCC  
CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS (CSIC)

Monitorización de edificios del Grupo SCHE-IETCC-CSIC. Proyectos: REFAVIV, 4 VIVIENDAS EN MADRID, CENTROS DOCENTES EN MADRID y LIFE my Building is Green

UNIDAD DE I+D SOBRE EFICIENCIA ENERGÉTICA EN LA EDIFICACIÓN (UiE3)  
CIEMAT

Análisis Experimental de Edificios en la Unidad de I+D UiE3 del CIEMAT. Objetivos, metodologías y aplicaciones

Ee/3D-VCR  
UNIVERSIDAD DE CASTILLA LA MANCHA (UCLM)

Metodología para la caracterización térmica de construcciones tradicionales en clima mediterráneo

TEP 130  
UNIVERSIDAD DE SEVILLA (US)

La monitorización en la evaluación de soluciones de protección solar en edificios terciarios. Valoración de variables energéticas, ambientales y de calidad del medioambiente interior

ABIO  
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID (UPM)

MODIF-HABIT. La experiencia del grupo ABIO-Universidad Politécnica de Madrid en monitorización aplicada a un proyecto de investigación. Modificación de los hábitos de uso y consumo de energía en la vivienda mediante la visualización de datos en función del contexto climático

## Grupos invitados

---

COMPHAS y ROBOLAB  
UNIVERSIDAD DE EXTREMADURA (UNEX)

Metodología para la monitorización de un edificio docente. Caso de estudio: Escuela Politécnica de Cáceres

Grupo ARM  
UNIVERSIDAD DE ALMERIA

Sistema abierto y escalable de supervisión, gestión eficiente de la energía y control del confort del edificio CIESOL basado en IoT y Cloud Computing

## Empresa colaboradora

---

InBiot Monitoring S.L.

Monitorización de la calidad del aire interior como herramienta de evaluación y mejora de la salubridad de un espacio



# GT3

## Edificios

Coordinación

INSTITUTO VALENCIANO DE LA EDIFICACIÓN

Isabel de los Ríos Rupérez

irios@five.es

La actividad desarrollada por el Grupo de Trabajo 3 de la Red Monitor ha permitido la puesta en común de los trabajos desarrollados recientemente por sus miembros en materia de medición de parámetros in situ en edificios existentes como metodología fundamental para el estudio del comportamiento térmico de la envolvente, de los consumos energéticos de instalaciones, de la calidad del aire interior, de las condiciones acústicas, del comportamiento de los usuarios, todo ello enfocado a la mejora del confort, el bienestar y la protección medioambiental.

Esta puesta en común se materializa en la colección de los nueve artículos de investigación que se exponen a continuación, los cuales muestran la importancia de la monitorización como fase metodológica de gran utilidad en estudios cuyos objetivos concretos son tan diversos como el perfeccionamiento de herramientas de simulación del comportamiento energético de edificios, el análisis de la incidencia en el consumo energético y el confort de los usuarios de la incorporación de determinadas medidas pasivas, la monitorización como parte de un proceso global para la toma de decisiones para la rehabilitación energética o la reorientación del comportamiento de los usuarios, entre otros.

**Monitorización del consumo de energía y ambiente interior en edificios de viviendas. TripleA-reno: rehabilitación energética más Atractiva, Amigable y Asequible basada en el comportamiento real de las viviendas**

*A. Sanchis, M. Navarro, B. Serrano, L. Ortega*

- Objetivo: Información sobre la cuantificación y visualización de datos recogidos de los usuarios y sus viviendas, para proporcionar información atractiva, comprensible y personalizada y demostrar los beneficios sociales de la rehabilitación energética a través de la monitorización. Identificación de aspectos relevantes para el diseño de mecanismos de alarma y recomendación. Planificación de un potencial proyecto de rehabilitación.
- Entorno monitorizado: 16 viviendas ubicadas en 6 edificios.
- Variables: Temperatura, humedad, velocidad de aire, CO<sub>2</sub>, VOC, formaldehidos, PM2,5 y 10, ruido, Iluminancia y consumos de energía.
- Equipo investigador: Área I+d+i - Internacional del Instituto Valenciano de la Edificación.

**Monitorización de edificios del Grupo SCHE-IETcc-CSIC. Proyectos: REFAVIV, 4 VIVIENDAS EN MADRID, CENTROS DOCENTES EN MADRID y LIFE my Building is Green**

*I. Oteiza, C. Alonso, F. Martín-Consuegra, B. Frutos, B. Arranz, G. Gómez*

- Objetivo: Descripción de monitorizaciones desarrolladas en 4 proyectos de investigación: Rehabilitación energética de las fachadas de viviendas sociales, REFAVIV- 4 VIVIENDAS EN MADRID, CENTROS DOCENTES EN MADRID y LIFE my Building is Green. El objetivo de estos proyectos abarca desde el estudio del comportamiento de determinadas soluciones de fachadas o del confort de los usuarios, hasta la propuesta de rehabilitación energética ajustada a las condiciones climáticas y la caracterización obtenida.
- Entorno monitorizado: 6 viviendas, 9 aulas en 3 centros docentes y 3 centros educativos.
- Variables: Temperatura, humedad relativa, CO<sub>2</sub>, estación meteorológica, puerta soplante, termografía, encuestas y consumos energéticos.

### **Análisis Experimental de Edificios en la Unidad de I+D UiE3 del CIEMAT. Objetivos, metodologías y aplicaciones**

*S. Soutullo, M.N. Sánchez, R. Olmedo,  
H. López, A. Castellanos, O. Seco,  
R. Enríquez, M.R. Heras, M.J. Jiménez*

- Objetivo: Metodologías de monitorización para la evaluación del comportamiento energético de los edificios en condiciones reales de uso y minimizar las discrepancias existentes con los modelos teóricos, utilizadas en múltiples proyectos de investigación desde 1986. Se citan los más recientes y relevantes
- Metodologías presentadas brevemente: Evaluación del comportamiento térmico de un edificio a partir de la caracterización climática. Obtención de índices de confort térmico. Confort cuantitativo: niveles de sensación térmica (PMV) y el porcentaje de personas insatisfechas (PPD). Confort adaptativo. Análisis basado en el estudio de tendencias. Caracterización mediante modelado empírico: Técnicas de identificación de sistemas. Técnicas de validación y calibración de modelos de simulación. Calidad de aire en edificios bioclimáticos.

### **Sistema abierto y escalable de supervisión, gestión eficiente de la energía y control del confort del edificio CIESOL basado en IoT y Cloud Computing**

*V. Pérez, C. Aparicio, F. Castilla, M. Monleón, J.L. Vivancos*

- Objetivo: Metodología para la caracterización térmica de una serie de tipos arquitectónicos basada en la monitorización de parámetros de temperatura y humedad de los edificios en uso, durante períodos representativos, y en la validación de los modelos mediante el ajuste de parámetros de ventilación e infiltración.
- Entorno monitorizado: 2 viviendas unifamiliares, una vivienda en un bloque y un bloque plurifamiliar.
- Variables: temperatura y humedad interior y exterior, temperaturas superficiales, velocidades interiores de aire o niveles de CO<sub>2</sub>.
- Equipo investigador: personal investigador de la Universidad de Castilla la Mancha.

**La monitorización en la evaluación de soluciones de protección solar en edificios terciarios. Valoración de variables energéticas, ambientales y de calidad del medioambiente interior**

*C.M. Calama-González, R. Suárez,  
A.L. León-Rodríguez, R. Escandón, A. Alonso*

- Objetivo: Análisis de sistemas de protección solar (film solar, celosía y persiana exterior) y su influencia en el comportamiento térmico-energético y en la calidad ambiental interior, comparando escenarios rehabilitados y no rehabilitados. Validación de modelos de simulación energética y elaboración de modelos numéricos dinámicos.
- Entorno monitorizado: 2 aulas en un centro educativo y 2 habitaciones en un centro hospitalario.
- Variables: demanda energética y consumo eléctrico de los sistemas de climatización, iluminación y ventilación, temperatura interior, humedad relativa, iluminancia natural interior, niveles de radiación solar, CO<sub>2</sub>, confort térmico, comportamiento del usuario (apertura de ventanas, de persianas, presencia, sistema de iluminación artificial, etc.)
- Equipo investigador: Grupo TEP 130. Universidad de Sevilla. Proyecto SUB-UMBRA.

**MODIF-HABIT. La experiencia del grupo ABIO-Universidad Politécnica de Madrid en monitorización aplicada a un proyecto de investigación. Modificación de los hábitos de uso y consumo de energía en la vivienda mediante la visualización de datos en función del contexto climático**

*M. Pérez, E. Cuerda, M. Barbero-Barrera,  
J. Neila*

- Objetivo: Analizar la incidencia real de información e interacción con los usuarios y la vinculación del consumo energético con el emplazamiento y, en concreto, con la Isla de Calor. Definición de métodos efectivos para actuar sobre el consumo energético y reorientar las investigaciones, programas públicos e inversión hacia estos. Metodología del proceso (selección de viviendas, instrumentos, protocolos de visualización, recogida y análisis de datos).
- Entorno monitorizado: Edificios residenciales. 60 viviendas ubicadas en Bilbao, Madrid y Valencia.
- Variables: Consumos de electricidad y gas, temperatura y humedad. Encuestas.

### **Metodología para la monitorización de un edificio docente. Caso de estudio: Escuela Politécnica de Cáceres**

*B. Montalbán, B. Muriel, M. Lucas, S. Barroso, P. Bustos, P. Núñez*

- **Objetivo:** metodología de inmótica social para el estudio del comportamiento del edificio y definición de soluciones que potencien el ahorro energético y el confort. Conjunto de fases que permite la caracterización del edificio, su evaluación previa, recogida de datos e información durante el uso, el diagnóstico y la definición de estrategias y finalmente el sistema de control y actuación (Medidas como avisos o alarmas. Indicadores para la retroalimentación del sistema).
- **Entorno monitorizado:** Edificios de la Universidad Politécnica de Cáceres. Proyecto INNOINVEST.
- **Variables:** temperatura y humedad relativa, CO<sub>2</sub>, consumo eléctrico, de agua y de gas, presencia de personas, uso de equipos, aportación energía renovable, temperatura de radiadores y de impulsión y retorno del agua de caldera.
- **Equipo investigador:** Personal investigador de la Escuela Politécnica de Cáceres

### **Sistema abierto y escalable de supervisión, gestión eficiente de la energía y control del confort del edificio CIESOL basado en IoT y Cloud Computing**

*J.D. Álvarez, M. Castilla, J.D Gil, F. Rodríguez y M. Pérez*

- **Objetivo:** Análisis de parámetros ambientales y su relación con índices de confort y su mejora. Comportamiento y eficiencia de la planta fotovoltaica. Eficacia del sistema de supervisión basado en la nube y en la idea de servicios.
- **Entorno monitorizado:** Centro de investigación de Energía Solar (despachos, laboratorios y planta fotovoltaica).
- **Variables:** 725 medidas entre las que se encuentran la temperatura del aire, plana radiante, de globo, humedad relativa, CO<sub>2</sub>, velocidad del aire, número de personas, iluminancia, consumos de agua, electricidad, gas o calor industrial. También existe una estación meteorológica.
- **Equipo investigador:** Unidad de I+D sobre Modelado y Control centro CIESOL. Grupo ARM. Universidad de Almería

## **Monitorización de la calidad del aire interior como herramienta de evaluación y mejora de la salubridad de un espacio**

*M. Figols, X. Aláez*

- **Objetivo:** Propuesta para el seguimiento continuo de la evolución de la calidad del aire interior, para analizar patrones de comportamiento, conocer la pauta de uso, el perfil de ocupación, el grado y fuente de contaminación, e identificar el potencial de mejora de un espacio en materia de calidad del aire interior.
- **Entorno monitorizado:** Edificios de oficinas y vivienda.
- **Variables:** evolución de la temperatura, humedad relativa, CO<sub>2</sub>, concentración de formaldehidos y de compuestos orgánicos volátiles totales.
- **Equipo investigador:** personal investigador de inBiot Monitoring S.L.

# Monitorización del consumo de energía y ambiente interior en edificios de viviendas

TripleA-reno: rehabilitación energética más Atractiva, Amigable y Asequible basada en el comportamiento real de las viviendas

INSTITUTO VALENCIANO DE LA EDIFICACIÓN (IVE) . GENERALITAT VALENCIANA

**A. Sanchis (1), M. Navarro (2), B. Serrano (3), L. Ortega (4)**

(1) Arquitecta. Investigadora. IVE Instituto Valenciano de la Edificación – Valencia (España)

(2) Ingeniera Industrial / Economista. Responsable Dpto. I+D+i internacional IVE Instituto Valenciano de la Edificación – Valencia (España)

(3) Dra. Arquitecta. UPV Universitat Politècnica de València – Valencia (España)

(4) Dra. Arquitecta. IVE Instituto Valenciano de la Edificación – Valencia (España)

Persona de contacto/ Corresponding author: [asanchis@five.es](mailto:asanchis@five.es) (A. Sanchis-Huertas)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3540-5289> (A. Sanchis-Huertas)

Monitorización del consumo de energía y ambiente interior en edificios de viviendas. TripleA-reno: rehabilitación energética más Atractiva, Amigable y Asequible basada en el comportamiento real de las viviendas

## RESUMEN

La industria fotovoltaica tiene gran potencial en la clie. Entre las barreras al mercado de la rehabilitación energética de viviendas se han señalado las relacionadas con el desconocimiento de sus costes y beneficios por los usuarios de las mismas. El objetivo de este estudio llevado a cabo en el contexto del proyecto H2020 'TripleA-reno' es obtener más información sobre la cuantificación y visualización de datos recogidos de los usuarios y sus viviendas, para proporcionar información atractiva, comprensible y personalizada y demostrar los beneficios sociales de la rehabilitación energética a través de la monitorización, e incluye los resultados y conclusiones del análisis realizado sobre el consumo de energía, el medio ambiente interior (IEQ) y los datos de bienestar y salud que se recopilaban a través de mediciones in situ realizadas en 6 edificios durante las fases previas al diseño de un proyecto de rehabilitación.

**Palabras clave:** Monitorización de edificios; TripleA-reno; H2020, Viviendas; Consumo de energía; Confort.

*Energy consumption and indoor comfort in Residential buildings. TripleA-reno: Attractive, Acceptable and Affordable deep renovation by a performance evidence-based approach*

## ABSTRACT

*Among the market barriers for deep renovation of residential buildings, those related to the lack of knowledge of costs and benefits by their final users have been identified. The objective of this study carried out in the context of the H2020 'Tri-pleA-reno' project is to obtain more information on the quantification and visualization of data collected from users and their homes, to provide attractive, understandable and personalized information and demonstrate the social benefits of energy renovation through monitoring, and includes the results and conclusions of the analysis carried out on energy consumption, indoor environmental quality (IEQ) and the health and well-being data that were collected through on-site measurements carried out in 6 buildings during the phases prior to the design of a renovation project.*

**Keywords:** Buildings monitoring; TripleA-reno; H2020; Dwelling; Energy consumption; Comfort



## 1. Introducción

Para alcanzar los objetivos de descarbonización de 2050, la mayoría de los edificios europeos requieren pasar por un proceso de rehabilitación (1). Sin embargo, existen muchas barreras que impiden que la renovación de los edificios alcance la escala necesaria, especialmente en el sector residencial. Estas barreras del mercado de la renovación energética de edificios de viviendas se han identificado, de acuerdo con la literatura, como barreras financieras, técnicas, procedimentales, regulatorias y de sensibilización o barreras sociales (2) (3).

El proyecto europeo H020 “TripleA-reno: Attractive, Acceptable and Affordable deep Renovation by a consumers orientated and performance evidence based approach” investiga procedimientos para una rehabilitación energética más Atractiva, Amigable y Asequible basada en las necesidades del usuario y el comportamiento real de las viviendas, y se propone afrontar las barreras relacionadas con la falta de información sobre los beneficios de la rehabilitación de los usuarios finales.

El objetivo general es hacer que la aceptación y la toma de decisiones respecto a la rehabilitación integral de las viviendas para lograr edificios de consumo casi nulo (nZE) sea atractiva para los usuarios y propietarios de dichas viviendas. TripleA-reno acomete este trabajo mediante el desarrollo de una plataforma que incorpora elementos de gamificación centrada en las necesidades y expectativas del usuario final para fomentar nuevos modelos de negocio basados en datos reales que faciliten la toma de decisiones; mejorar el resultado de las rehabilitaciones mediante un mejor control de la calidad, a través de programas de formación y (auto) evaluación de los trabajos realizados; proporcionar información atractiva, comprensible y personalizada sobre los resultados reales alcanzados, en relación al estado original y a las previsiones del proyecto; y demostrar los beneficios resultantes de este tipo de procedimientos a través de la monitorización de diferentes parámetros en viviendas reales.

### Antecedentes

La rehabilitación energética de los edificios se asocia a diferentes tipos de beneficios (4): beneficios ambienta-

les, como ahorro de energía y reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) asociadas; beneficios económicos tanto para el individuo como para toda la sociedad, como ahorros económicos, aumento del valor de la propiedad y satisfacción del inquilino o creación de empleos; y beneficios sociales: beneficios para la salud, mayor bienestar y comodidad o reducción de la pobreza energética. Estos últimos necesitan atención específica para desbloquear el mercado de la rehabilitación energética, especialmente en aquellos países o regiones donde las condiciones climáticas hacen que las inversiones para el ahorro o mejora de la eficiencia energética requieran un largo período de recuperación. Por lo tanto, es necesario abordar la evaluación, cuantificación y visualización de estos beneficios de cara a ofrecer información sobre estos a los usuarios finales.

El valor de los edificios en relación a la salud y el bienestar de sus ocupantes es directo, dada su capacidad para proporcionar calor y frescura, luz y sombra, compañía y cobijo, emoción y descanso, y se ha demostrado que los edificios que persiguen activamente un diseño sostenible, también han mejorado la percepción y el uso del edificio por parte de sus ocupantes, proporcionando tanto beneficios económicos como sociales (5). La relación entre salud y diseño arquitectónico es vital para el usuario de la vivienda, pues es el lugar donde más tiempo pasa, por lo que en los últimos años, el diseño de edificios sostenibles ha pasado de un enfoque centrado en la eficiencia energética a un enfoque centrado en las necesidades y expectativas de los ocupantes (6), llevando a orientar los sistemas de certificación de energía y sostenibilidad hacia el confort de los ocupantes y la conservación de los recursos naturales (7). En este contexto, la investigación en el área del diseño de edificios sostenibles y el bienestar del usuario se centra en la eficiencia energética, el aprovechamiento de la luz natural, la ventilación, la acústica y la percepción de los usuarios (8).

Generalmente, se considera que cuatro factores caracterizan la aceptabilidad de un ambiente interior (IEQ): calidad del aire interior (IAQ), ruido, iluminación y confort térmico (9). Para evaluarlos, se han desarrollado estándares que definen rangos de aceptabilidad y valores límite (10), como los establecidos en la norma europea EN 15251: 2007, que utilizamos en este estudio. Sin embargo, cabe preguntarse si los rangos

y criterios que vinculan la satisfacción general con los valores de IEQ universalmente aceptados, basados en estándares internacionales y esquemas de certificación de reconocido prestigio, son aplicables en todos los edificios, tipos, climas y poblaciones (11) (12) de forma uniforme; o si la variabilidad en los valores de los diferentes parámetros de IEQ afectan de la misma forma a la aceptación del ambiente interior.

Además, se observa cómo, en el día a día, estos beneficios no se valoran o comunican adecuadamente a la hora de evaluar las diferentes opciones de rehabilitación de viviendas o de edificios de viviendas, debido a la dificultad de cuantificarlos y por lo tanto de ser monetizados por los inversores o propietarios y valorados por los consumidores o usuarios de las viviendas.

### Objetivo

El objetivo de este estudio llevado a cabo en el contexto del proyecto TripleA-reno es obtener más información sobre la cuantificación y visualización de estos beneficios, para cumplir con los objetivos de proporcionar información atractiva, comprensible y persona-

lizada y demostrar los beneficios sociales de la rehabilitación energética a través de la monitorización, e incluye los resultados y conclusiones del análisis realizado sobre el consumo de energía, el medio ambiente interior (IEQ) y los datos de bienestar y salud que se recopilaban a través de mediciones in situ realizadas en 6 edificios durante las fases previas al diseño del proyecto de rehabilitación con un triple objetivo:

- 1) Permitir comparar el rendimiento de los edificios antes y después de su rehabilitación (para demostrar los beneficios de la renovación).
- 2) Identificar las relaciones entre los diferentes indicadores de energía, IEQ y bienestar/ salud para traducirlos en información y recomendaciones comprensibles, identificables y amigables para los usuarios finales (para cuantificar los beneficios sociales de la renovación).
- 3) Validar los rangos de confort establecidos en base a estándares internacionales y esquemas de certificación de reconocido prestigio de los indicadores incluidos en la etiqueta TripleA-reno sobre energía, calidad del ambiente interior y bienestar (para informar sobre los beneficios de la renovación).

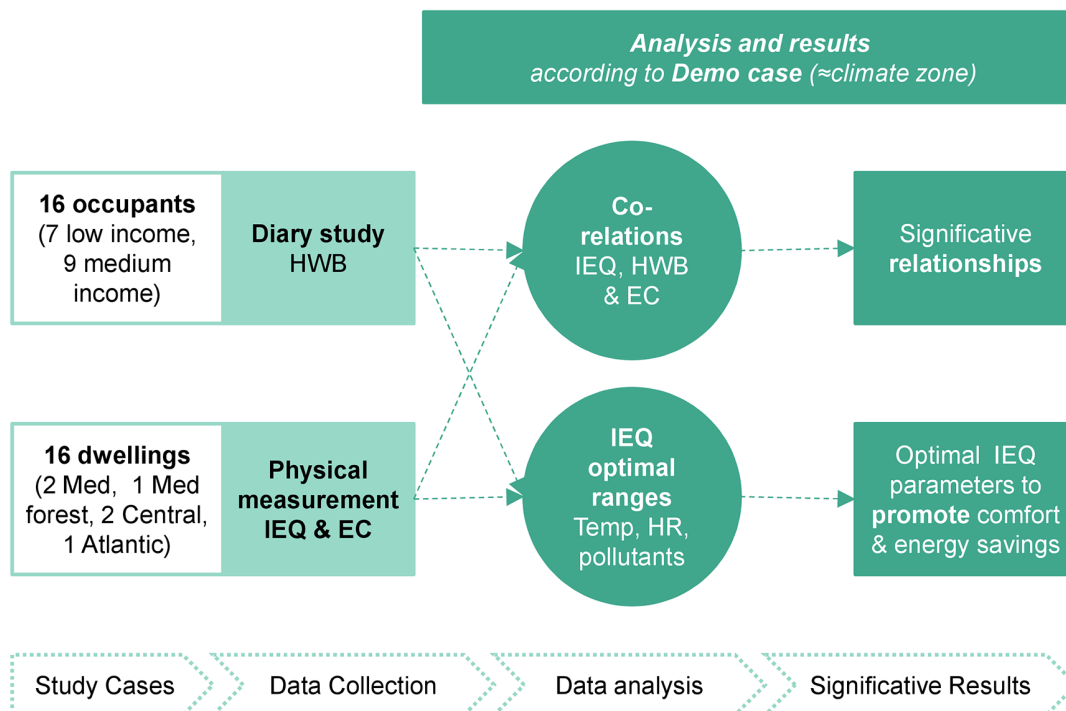


Figura 1. Diseño del estudio

## 2. Metodología

El análisis llevado a cabo durante el proyecto parte de la medición de diferentes parámetros de energía, IEQ y bienestar y salud de los ocupantes en 16 viviendas ubicadas en 6 edificios demostradores diferentes localizados en diferentes países de Europa (Grecia, España, Italia, Eslovenia, Países Bajos y Hungría), a lo largo de dos períodos diferentes de una semana de duración, para las condiciones de invierno y verano. La selección de las viviendas y su caracterización, las medidas realizadas y los equipos utilizados se llevaron a cabo acorde a un protocolo de medición común llevado a cabo previamente a la recogida de los datos. Este estudio (Figura 1) recoge los resultados del período de verano antes de la rehabilitación energética de los edificios demostradores.

### 2.1. Diseño del estudio

Dado que los datos se recopilan en diferentes lugares (Grecia, España, Italia, Eslovenia, Países Bajos y Hungría) y tiempos (diferentes semanas entre los meses de junio y agosto de 2019), por diferentes personas y con diferentes equipos (acorde a las condiciones y limitaciones establecidas en el protocolo de monitorización), es importante utilizar las mismas variables y métodos, de cara a poder resumir e interpretar datos, definir dependencias e inferir conclusiones.

### 2.2. Selección de viviendas y caracterización

TripleA-reno pretende analizar una amplia gama de edificios residenciales que cubra en la mayor medida posible las diferentes tipologías que podemos encontrar en el inventario de edificios residenciales existentes en Europa, caracterizados por diferentes tipos, condiciones climáticas, antigüedad, régimen de propiedad, o tamaño del edificio, entre otras variables. La información principal de las viviendas participantes en el estudio se resume en la Figura 2.

Éstas pertenecen a los 6 edificios de demostración seleccionados, que se caracterizan según los siguientes escenarios:

- Clima mediterráneo, edificio multifamiliar, año de construcción 1980', destinado a alquiler social o estudiantes
- Clima bosque medio, edificio multifamiliar, año de construcción 1970', destinado alquiler social
- Clima central, apartamentos en torre, año de construcción 1970', destinado a alquiler familias
- Clima central, apartamentos en torre, año de construcción 2000', régimen en propiedad personas mayores
- Clima atlántico, casa adosada unifamiliar, año de construcción 2000, régimen en propiedad familia

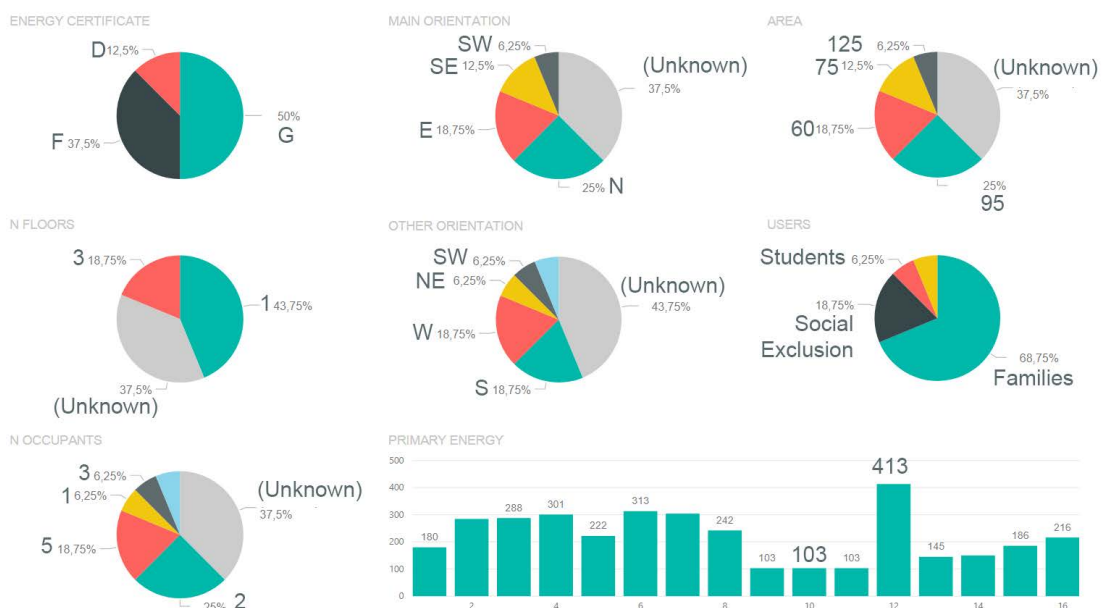


Figura 2. Viviendas

### 2.3. Toma de datos

Los datos evaluados en este informe se recopilaban durante los meses de verano del año 2019 (junio a agosto). La toma de datos duró una semana (de martes a lunes) en cada vivienda, en el intervalo de entre 1 y 4 semanas consecutivas por edificio (dado que en varios edificios se fue cambiando el equipo de una vivienda a la siguiente), con una frecuencia de muestreo variable entre 5 minutos y 1 hora. Los datos recopilados y sus requisitos se definieron previamente en. Protocolo de monitorización, que se resume en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros monitorizados

Parámetro	Oblig.	Tipo	Unidades
<b>IEQ</b>			
Temperatura	S	Serie temporal	°C
Humedad Relativa			%
Velocidad de aire			m/s
CO <sub>2</sub>			ppm
VOC	S	Medida puntual	µg/m <sup>3</sup>
Formaldehidos	N		ppb
PM2,5			µg/m <sup>3</sup>
PM10			µg/m <sup>3</sup>
Ruido	N	Serie temporal	dB(A)
Iluminancia			lux
<b>Energía</b>			
Consumo	S	Serie temporal	Wh
<b>Bienestar</b>			
Sintomatología	S	Medida puntual	7 categorías
Molestias			
Confort térmico			
Abrigo			4 categorías
Actividad			

Por un lado, los datos de energía e IEQ se recopilaban mediante la instalación y uso de equipos específicos; por otro lado, los datos percibidos de bienestar y salud se recopilaban a través de estudios diarios que tenían como objetivo capturar la dimensión percibida de las variables de interés (Figura 3). Además, las características del edificio y las viviendas se recogieron en tablas que describen los sistemas constructivos, de la envolvente térmica y las instalaciones.

Los responsables de llevar a cabo cada campaña de monitorización eran libres de seleccionar el equipo específico que se adaptara a sus necesidades, de acuerdo con los requisitos mínimos establecidos en el protocolo de monitorización. Entre los equipos seleccionados, se encuentran:

- TROTEC BZ-30, BQ-30, PC220 y BQ-16 para medidas de temperatura, humedad relativa, CO<sub>2</sub>, concentración de partículas, formaldehidos y VOCs
- Smart IoT Labs, para temperatura, humedad relativa, iluminancia, presencia y consumo de energía
- DeltaOHM Hd32.3 y 21AB para medidas de CO<sub>2</sub>, temperatura, humedad relativa y velocidad del aire
- Lora SENSI, para medidas de temperatura, humedad relativa y CO<sub>2</sub>
- EXTECH SD 800, para medidas de CO<sub>2</sub>, humedad y temperatura
- KIMO KT100 para medidas de humedad y temperatura
- Efergy, para consumo de energía

Por otro lado, 16 usuarios de las viviendas estudiadas completaron los estudios diarios para evaluar el bienestar subjetivo, la aparición de síntomas, la presen-

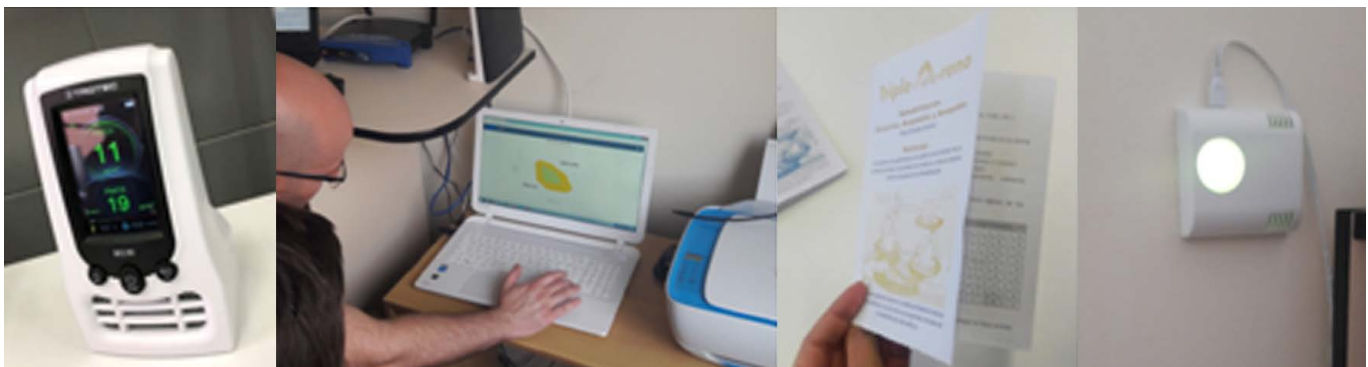


Figura 3. Toma de datos

cia de molestias y el confort. Estos estudios diarios se completaron dos veces al día durante siete días consecutivos, coincidentes con la medición de variables IEQ y energía. Para llevar a cabo los estudios diarios, los responsables de las diferentes campañas de motorización eran libres de designar las herramientas requeridas, de acuerdo con el protocolo de monitorización y sus necesidades específicas, entre las que se encontraba traducir los cuestionarios a los idiomas nativos. La mayoría de ellos elige realizar encuestas en papel, para lo que se distribuyeron cuadernillos preparados al efecto.

Los datos se recopilaron utilizando las plantillas establecidas en el protocolo común, en forma de hojas de cálculo de Microsoft Office Excel, en cada vivienda monitorizada, a partir de las cuales se alimenta una base de datos estructural SQL en Postgres, cuyo modelo de datos puede verse en la Figura 4, para combinar, integrar y homogeneizar los datos y permitir su análisis.

## 2.4. Análisis

El objetivo es estudiar las conclusiones que podemos inferir de unas series de datos heterogéneas que podrían ser recogidas por cualquier usuario de viviendas del territorio europeo. Así pues, a partir de una mínima homogeneización de los datos, el estudio se diseña de acuerdo con los siguientes pasos:

- 1) Descripción de los datos IEQ, consumo de energía y condiciones de bienestar y salud de los ocupantes recopilados, mediante gráficos y tablas que incluyen valores medios, desviación estándar, valores mínimos y máximos, y tiempos fuera de confort, en total y para cada uno de los conjuntos de datos.
- 2) Detección de patrones y tendencias y exploración de hipótesis y cláusulas de causalidad mediante el planteamiento de preguntas de investigación.
- 3) Estudio de dependencias entre IEQ, consumo de energía y confort y salud percibidos a partir de las preguntas anteriores, mediante el análisis de correlación múltiple entre las diferentes variables.

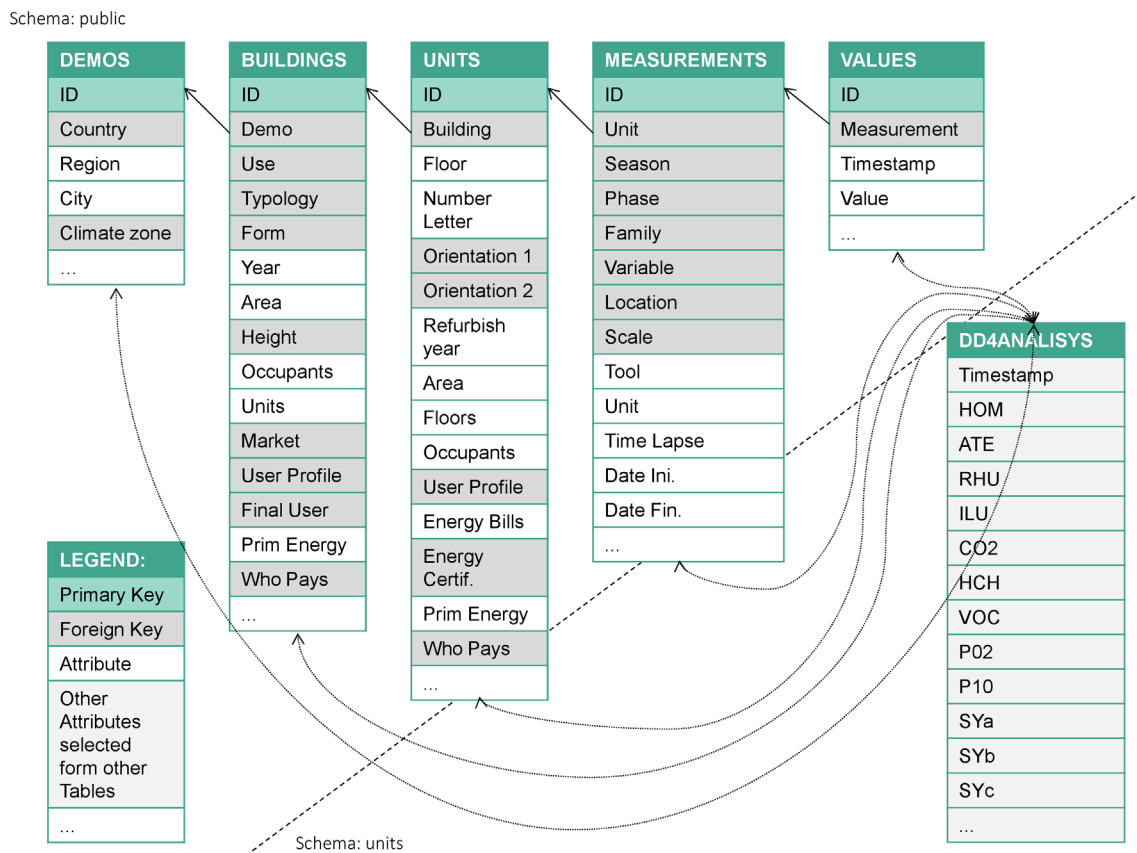


Figura 4. Base de datos

4) Establecimiento (validación) de rangos óptimos, mediante un análisis adicional si las relaciones anteriores son significativas, comparación con los valores establecidos en la etiqueta TripleA-reno y detección de valores límite y umbrales que puedan accionarse para desencadenar la reacción de los usuarios hacia una mayor aceptación de la posibilidad de acometer una intervención de rehabilitación energética.

Tanto la descripción de los datos como su análisis se lleva a cabo mediante el uso de los programas informáticos R 4.0.0 y Microsoft PowerBI, para el conjunto completo de los datos y para cada edificio monitorizado, que representa diferentes características, zonas climáticas (Mediterráneo, Centro o Atlántico) o grupos de ingresos (bajo y medio).

La integración de datos percibidos y medidos considerará los valores de IEQ y consumo de energía recopilados dentro de las tres horas previas a la finalización del estudio diario de cada persona de la muestra. Los rangos óptimos considerados para los parámetros de IEQ se basan en la norma europea EN 15251: 2007 y otros esquemas de certificación analizados en el proyecto, cristalizados en la etiqueta combinada TripleA-reno de energía, IEQ y confort. El método elegido para verificar las posibles relaciones entre variables es la correlación o dependencia, definida comúnmente como cualquier relación estadística, ya sea causal o no, entre variables aleatorias. Sin embargo, la correlación no implica causalidad, y, en consecuencia, se debe prestar atención a las posibles relaciones de causalidad inferidas ilógicamente de la correlación antes de llegar a conclusiones erróneas, como la causalidad inversa, la causa común, la causa bidireccional, y la casualidad.

### 3. Resultados

Los resultados que se muestran en este artículo están basados en los datos recogidos en el período de verano. Así pues, se incluyen a continuación las estadísticas descriptivas basadas en análisis univariable de diferentes indicadores, que describen la situación base de las viviendas y que van a definir el punto de partida de la futura evaluación del proyecto.

#### 3.1. Descripción de los datos

Para los datos monitorizados sobre energía e IEQ, se presentan medias y desviaciones estándar en las siguientes figuras y tablas. Los datos revelan diferencias dentro de los parámetros de interés, lo que podría explicarse por la amplitud del ámbito de estudio, a nivel de la UE y, por lo tanto, por las diferentes condiciones climáticas y las diversas tipologías y características de los edificios, descritas anteriormente. Así, de acuerdo con las características de las viviendas monitorizadas, los datos recopilados podrían desglosarse según:

- Ubicación: País, Zona climática, etc.
- Función: uso, tenencia
- Forma: tipología, forma, altura, etc.
- Edad: año
- Tamaño: área, ocupantes, viviendas
- Gente: mercado, perfil, ¿quién paga la energía?
- Energía: calificación energética, según EPC

Tabla 2. Datos de España (zona climática 1, años 80, edificio multifamiliar de baja altura, clase baja en régimen de alquiler social)

ES	$\mu$	Max	min	DS	FC
Ene	898,42	2.758,33	89,76	551,44	
Temp.	27,39	31,00	23,92	1,25	94%
HR	47,94	71,54	18,82	10,35	3%
llu.	63,04	540,83	0,00	105,78	
CO <sub>2</sub>	670,67	823,00	477,00	144,25	0%
HCHO	0,00	0,00	0,00	0,00	
VOC	3,70	6,50	1,20	2,17	
PM2.5	15,00	37,00	10,00	9,87	
PM10	27,00	67,00	20,00	17,63	

Tabla 3. Datos de Hungría (zona climática 3, años 00, torre de apartamentos, clase media en régimen de propiedad)

HU	$\mu$	Max	min	DS	FC
Ene	191,52	800,00	0,00	146,74	
Temp.	24,58	27,34	20,10	1,36	45%
HR	51,06	75,60	25,70	11,75	17%
CO <sub>2</sub>	549,58	1.723,00	414,00	177,31	5%
HCHO	0,01	0,01	0,01	0,00	
VOC	1,23	1,43	1,07	0,15	
PM2.5	6,40	6,40	6,40	0,00	
PM10	24,10	24,10	24,10	0,00	

En este caso, los datos se resumen por edificio, es decir, por país, ya que los conjuntos de datos recopilados en cada uno de ellos son los más homogéneos y representan diversos escenarios, establecidos en la sección 2.2 (zonas climática, antigüedad, tipo de edificio, perfil de ocupantes o régimen de tenencia), tal y como se observa en la Tabla 2 y la Tabla 3, donde se demuestra una menor variabilidad de los datos y un comportamiento diferenciado, tanto en el consumo de energía como en los parámetros higrotérmicos o los tiempos fuera de confort.

Atendiendo a la distribución de las variables en los diferentes escenarios, se observa:

### Consumo de energía eléctrica

La curva de consumos eléctricos (Figura 5) sugiere que viviendas dependen de esta fuente de energía; que viviendas tienen electrodomésticos de gran consumo, probablemente viejos e ineficientes, que provocan picos de muy alto consumo; o patrones de conducta, como que usuarios pasan más tiempo en casa según qué

días. Además, el paso de los días se delimita claramente y los fines de semana muestran una curva diferenciada.

### Temperatura

Las gráficas de temperatura (Figura 6) muestran cómo la mayoría de las viviendas están fuera de confort térmico establecido por la etiqueta combinada TripleA-re-no de energía, IEQ y confort (23.5 - 25.5 °C) la mayor parte del tiempo, y sugieren la existencia de espacios sin sistemas de ventilación o enfriamiento (como los griegos, referentes a espacios comunes, donde los datos de energía indican que no deben tener un sistema de enfriamiento, pero se enfrían por la noche, por una mala envolvente térmica o ventanas abiertas); espacios que no ventilan adecuadamente (una de las viviendas eslovenas no se enfría en absoluto: ni eléctricamente, ni mecánicamente, ni naturalmente, ya que la temperatura sigue creciendo); o viviendas incapaces de enfriarse adecuadamente (las viviendas españolas, con sistemas de refrigeración de alto consumo, siempre están por encima de la temperatura de confort).

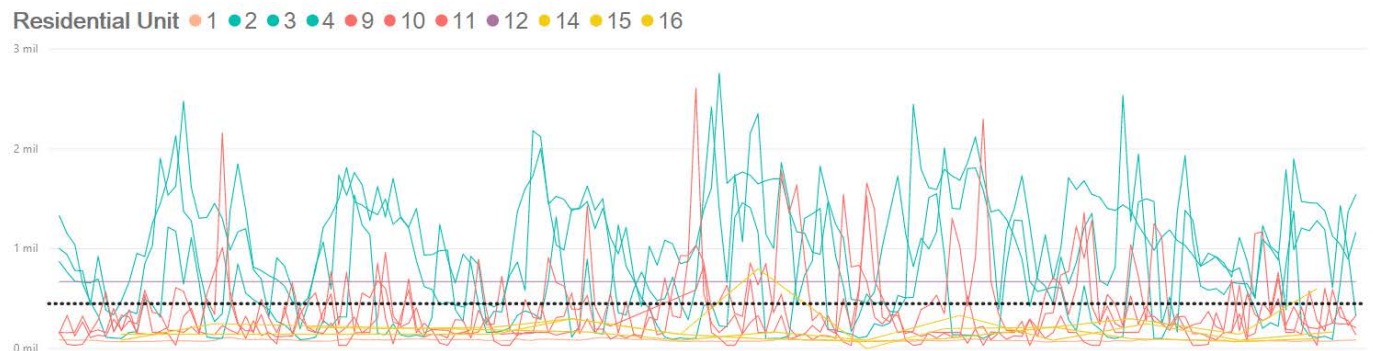


Figura 5. Consumo eléctrico horario de martes a lunes

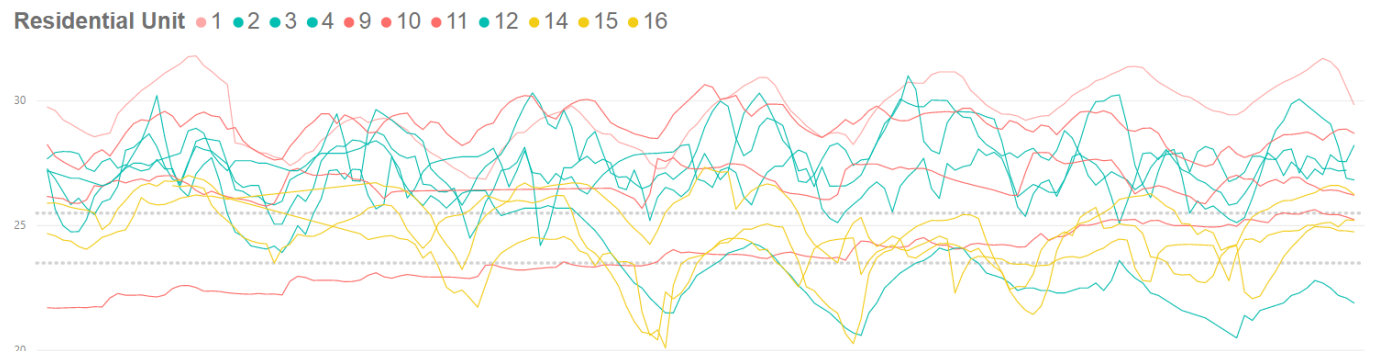


Figura 6. Temperatura

### Humedad relativa

Los datos de HR muestran una mayor uniformidad, siendo que la mayoría de las veces la humedad relativa dentro de las viviendas está dentro del rango de confort establecido por la etiqueta combinada TripleA-reno de energía, IEQ y confort (30-70%). Este rango de confort podría considerarse demasiado amplio, pues por lo general, existe una gran diferencia entre el confort térmico a 30°C con un 30% de humedad que con un 70% de humedad. Por lo tanto, será analizado en mayor profundidad en las siguientes monitorizaciones para validar o modificar el rango de confort térmico establecido por la etiqueta combinada TripleA-reno de energía, IEQ y confort. Por otro lado, es notable cómo unas viviendas (las españolas) tienen una distribución de valores más picuda (podría explicarse por la distribución de las viviendas y los hábitos de sus ocupantes - puertas abiertas durante los tiempos de cocción y sala de estar está colindante con la cocina) que otras (viviendas húngaras), con mayor variabilidad, pero con curvas más suaves.

### CO<sub>2</sub> y otros contaminantes

Los resultados en este parámetro muestran valores muy altos de concentración de CO<sub>2</sub> en momentos específicos durante el día (muy fuertes en un apartamento esloveno). Esto debe analizarse más a fondo para generar recomendaciones con el objetivo de disminuir estos altos valores de CO<sub>2</sub>, ya que denota la falta de patrones de ventilación adecuados o de puntos de emisión ‘descontrolados’.

Para otros contaminantes, observamos cómo todos los valores están por debajo de los límites de confort y salud, y solo mencionamos cómo cuanto menos ventilado (según las variables anteriores) está el apartamento, más contaminado (oscuro) y poco saludable.

Estas observaciones sirven como base para posibles recomendaciones, y se combinan con las respuestas recibidas de los ocupantes en cuanto a parámetros percibidos, cuyas medias y desviaciones estándar se presentan en las tablas y figuras siguientes, donde se revelan diferencias significativas en las respuestas aportadas por las viviendas participantes en el estudio.

### Sintomatología

Si se trata de síntomas relacionados con la salud (Tabla 4), existen diferencias significativas entre las viviendas en cuanto a problemas respiratorios y problemas musculares ( $p = .05$ ), y también, aunque menos significativos, en problemas visuales. La mayoría de los síntomas reportados son también los musculares y respiratorios, siendo los relacionados con la visión inexistentes en algunas de las viviendas estudiadas (Figura 7).

Tabla 4. Datos sobre sintomatología reportados)

ES	$\mu$	min	Max	DS	Sig(95%)
Muscular	0,80	0,00	2,40	1,13	1,28
Visión	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Respiratorios	0,75	0,00	2,25	1,06	1,20
HU	$\mu$	min	Max	DS	Sig(95%)
Muscular	0,56	0,19	1,04	0,55	0,17
Visión	0,37	0,04	0,75	0,58	0,18
Respiratorios	0,62	0,05	1,09	0,58	0,18

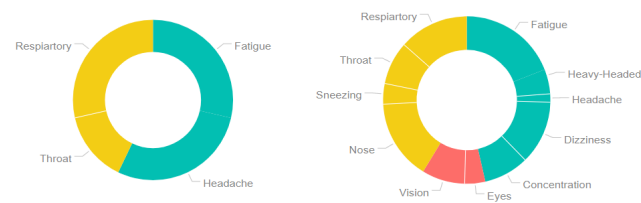


Figura 7. Síntomas reportados por los usuarios españoles (izquierda) y húngaros (derecha)

### Molestias

Para las molestias ambientales (Tabla 5), existen diferencias significativas entre las viviendas en cuanto a las relacionadas con el ruido y el polvo ( $p = .05$ ) y no tanto para las relacionadas con el aire o la luz, siendo estas últimas mucho más acusadas en el caso español que en el húngaro. Los resultados muestran (Figura 8) que las molestias relacionadas con el aire son los más acusantes en ambos casos (aunque mucho más en España), seguidas por las relacionadas con el ruido. Esto puede estar relacionado con la debilidad de la envolvente del edificio, específicamente con la estanqueidad de puertas y ventanas.



Tabla 5. Datos sobre molestias ambientales reportadas

ES	$\mu$	min	Max	DS	Sig(95%)
Aire	2,50	2,00	3,00	0,41	0,46
Ruido	3,33	0,00	6,00	2,49	2,82
Luz	0,50	0,00	1,50	0,71	0,80
Polvo	2,00	0,00	6,00	2,83	3,20
HU	$\mu$	min	Max	DS	Sig(95%)
Aire	0,99	0,27	1,57	0,66	0,20
Ruido	1,93	0,57	3,71	1,53	0,46
Luz	0,55	0,11	1,39	0,72	0,22
Polvo	1,07	0,29	1,71	1,35	0,41

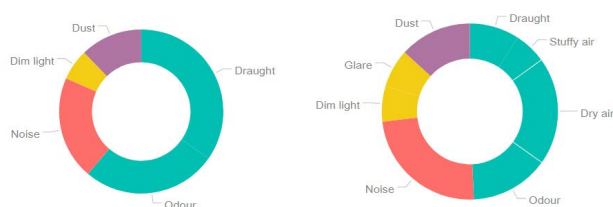


Figura 8. Molestias reportadas por los usuarios españoles (izquierda) y húngaros (derecha)

### 3.2. Relaciones y dependencias

Uno de los objetivos principales de TripleA-reno es desacoplar el concepto establecido de que una mayor comodidad y bienestar implica un aumento en el consumo de energía. Por lo tanto, partiendo de este supuesto, se ha realizado una investigación sobre la relación entre variables y conjuntos de variables sobre el consumo de energía, IEQ, confort térmico percibido, sintomatología o molestias ambientales, para encontrar patrones y tendencias en el comportamiento de variables concretas que permitan la alerta, previsión, planificación e intervención energética en la vivienda, tales como: ¿cómo afecta la variación de la temperatura o el CO<sub>2</sub> interior al consumo de energía?, y ¿cómo se relacionan la temperatura y el CO<sub>2</sub> entre ellos? ¿Y con la presencia de partículas?, o ¿qué síntomas y molestias aparecen en los diferentes niveles de consumo de energía o de temperatura? y ¿qué relación existe entre síntomas y molestias?

Este análisis proporciona una lógica que aplicar posteriormente en mecanismos concretos de aviso o recomendación a los usuarios.

### Energía y IEQ

Dado que, como se indica anteriormente, uno de los objetivos principales de TripleA-reno es desacoplar el concepto establecido de que una mayor comodidad y bienestar implica un aumento en el consumo de energía, se ha prestado especial atención a correlaciones subyacentes entre parámetros IEQ que pueden ayudar a explicar dependencias aparentes del consumo de energía.

A la vista de los datos podría inferirse que el consumo de energía está relacionado con la iluminación o la presencia de partículas, estando ambos relacionados con la temperatura. De acuerdo con esto, es más lógico pensar que es la temperatura la que ‘afecta’ al consumo de energía, dado que podría aquí existir una relación de causalidad (inversa): a mayor temperatura exterior (verano), mayor funcionamiento de los sistemas de enfriamiento y, por lo tanto, temperaturas interiores más frías, y así pues, el descenso de la temperatura interior va a indicar un potencial aumento del consumo de energía (y de la presencia de partículas, movidas por los sistemas de enfriamiento basados en aire). Esto se relaciona también con la iluminación, ya que otra forma de protegerse de las altas temperaturas exteriores (y, por lo tanto, un mecanismo para reducir la temperatura interior), es cerrar persianas o cortinas.

### Energía y confort percibido

Las relaciones entre consumo de energía y aparición de síntomas relacionados con la salud o la presencia de molestias ambientales son más inciertas, dado que muy posiblemente se relacionan a través de variables IEQ (parámetros higrotermodinámicos o presencia de contaminantes), que a su vez van a depender (como la demanda de energía) de las características constructivas y los sistemas instalados en las viviendas. Se podría identificar relaciones positivas razonables entre el consumo de energía y las corrientes de aire, presencia de olores o el polvo, lo que apuntaría a una estanqueidad al aire débil y en general a la calidad de la envolvente del edificio.

## IEQ y confort percibido

En esta sección se investiga la colinealidad y dependencia interna de las variables que lo componen. Los parámetros higrotérmicos son fuertemente interdependientes, así como la presencia de partículas de diferentes tamaños; y los síntomas y molestias tienden a agruparse (fatiga, dolor de cabeza, problemas de garganta y respiratorios; corriente de aire, olor, ruido y polvo); por lo que su aparición podría señalar a las características de la envolvente, y un análisis que incluya la transmitancia térmica podría ayudar.

Finalmente podría existir también una relación inversa entre síntomas y molestias, debido a que las personas que informan su percepción son más sensibles a sus propios síntomas que a las molestias externas, por lo que, cuando informan de los primeros, pueden “olvidarse” de los últimos.

## 4. Conclusiones

### 4.1. Discusión y lecciones aprendidas

A la vista del proceso llevado a cabo en los 6 edificios de muestra en el contexto del proyecto TripleA-reno, se observan diferentes temas a los que prestar atención que pueden influir en el diseño de los mecanismos de alarma y recomendación, y planificación de un potencial proyecto de rehabilitación:

- La lectura de los datos continuos en forma de gráficos da más información que el resumen del periodo en una serie de números, aunque proporcionar un valor límite (rangos de confort a explorar en paso 4) puede ser aun de mayor utilidad.
- La frecuencia de muestreo debe equilibrar precisión y trabajabilidad e inteligibilidad. Una solución podría ser guardar temporalmente las series de datos con frecuencias mayores para analizar en caso de detección de anomalías en frecuencias menores.
- La cantidad de variables medidas puede precisar del uso de demasiados equipos. Es aconsejable recoger el mayor número de variables posibles en las viviendas piloto para establecer relaciones y llegar a conclusiones fiables, pero a la hora de implementar los resultados, la monitorización de unas pocas variables puede ser suficiente para inferir una gran cantidad de reacciones.
- En cuanto a la calidad de los datos recogidos, señalar la diferente receptividad y expectativas de los usuarios a las diferentes técnicas de muestreo/monitorización: hacer hueco a un pequeño equipo no implica el mismo grado de invasión en la vivienda o en los hábitos de sus usuarios como la toma de datos percibidos dos veces al día.
- Finalmente, dilucidar la causalidad de los incrementos o descensos en las variables de interés es necesario para crear recomendaciones fiables, pero es indiferente para su implementación, donde ya solo es necesario conocer el valor límite de qué parámetro va a desencadenar una serie de relaciones que lleva a recomendar una reacción.

## 4.2. Próximos pasos

La inclusión en el estudio de los datos del periodo de invierno y de la fase post renovación van a permitir refinar estos resultados preliminares, y pasar a la siguiente etapa de análisis, donde se cualificarán las relaciones y se cuantificarán valores límite para, de acuerdo con lecciones aprendidas, obtener:

- Visualizaciones más Atractivas: rendimiento real de edificios renovados y beneficios de la renovación (imágenes mejor que números).
- Recomendaciones más Aceptables: las propuestas de renovación apelarán a la eficiencia energética, y también a una mayor comodidad y salud.
- Etiquetado más Asequible: redibujando los rangos de confort establecidos en los indicadores incluidos en la etiqueta de rendimiento combinado TripleA sobre energía, ambiente interior y bienestar.
- Integración TripleA: alimentar la plataforma con los resultados anteriores para incentivar a los propietarios de viviendas a renovar sus viviendas / edificios.

## 5. Agradecimientos

Este documento se basa en los resultados del proyecto “TripleA-reno: Attractive, Acceptable and Affordable deep Renovation by a consumers orientated and performance evidence based approach”, que recibió fondos del programa marco de la Unión Europea H2020-EE-2017-CSA-PPI para la coordinación y la acción de apoyo EE-11-2016-2017 “Overcoming market barriers and promoting deep renovation of buildings”, en virtud del acuerdo de subvención n° 784972. La Comisión Europea no es responsable del uso que pueda hacerse de la información que este documento contiene.

## 6. Referencias

- (1) BPIE. (2017). State of the building stock briefing.
- (2) Ipsos, Navigant. (2019). Comprehensive study of building energy renovation activities and the uptake of nearly zero-energy buildings in the EU. European Union.
- (3) Cheonghoon Baek, S. P. (2012). Policy measures to overcome barriers to energy renovation of existing buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* , 16 (6), 3939-3947.
- (4) DIRECTORATE GENERAL FOR INTERNAL POLICIES. (2016). Boosting Building Renovation: What potential and value for Europe? Brussels: European Union - Policy Department A: Economic and Scientific Policy.
- (5) Myers, G. R. (2008). Sustainable property – the future of the New Zealand Market. *Pacific Rim Property Research Journal* , 14 (3), 298-321.
- (6) Steemers, K. (2003). Towards a research agenda for adapting to climate change. *Building Research & Information* , 31 (3-4), 291-301.
- (7) Liang, H. e. (2014). Satisfaction of occupants toward indoor environment quality of certified green office buildings in Taiwan. *Building & Environment* , 72, 232-242.
- (8) Paul, W. &. (2008). A comparison of occupant comfort and satisfaction between a green building and a conventional building. *Building & Environment* , 14 (11), 1858-1870.
- (9) ASHRAE. (2016). Guideline 10-2016. Interactions affecting the achievement of acceptable indoor environments. The American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- (10) Rosch, P. (2001). The quandary of job stress compensation. *Health and Stress* (3), 1-4.
- (11) Brager, G. S. (2001). Climate, Comfort, & Natural Ventilation: A new adaptive comfort standard for ASHRAE Standard 55. Moving Thermal Comfort Standards into the 21st Century. Windsor, UK.
- (12) Frontczak, M. W. (2001). Literature survey on how different factors influence human comfort in indoor environments. *Building and Environment* , 46 (4), 922-937.

# Monitorización de edificios del Grupo SCHE - IETcc - CSIC

Proyectos: REFAVIV, 4 VIVIENDAS EN MADRID, CENTROS DOCENTES EN MADRID y LIFE my Building is Green

SCHE-IETCC. CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS (CSIC)

**I. Oteiza (1), C. Alonso (1), F. Martín-Consuegra (1), B. Frutos (1), B. Arranz (2), G. Gómez (3)**

(1) Dr. Arq. Investigador. Sistemas constructivos y Habitabilidad en la Edificación(SCHE). Instituto Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja(IETcc). CSIC, Madrid (España)

(2) Dra. Arq. Investigadora. Grupo TISE- Universidad Politécnica de Madrid, (España)

(3) Arq. Investigadora. Sistemas constructivos y Habitabilidad en la Edificación(SCHE). Instituto Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja(IETcc). CSIC, Madrid (España)

Persona de contacto/Corresponding author: [ioteiza@ietcc.csic.es](mailto:ioteiza@ietcc.csic.es) (I. Oteiza)

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7815-3109> (I. Oteiza)

## Monitorización de edificios del Grupo SCHE - IETcc - CSIC. Proyectos: REFAVIV, 4 VIVIENDAS EN MADRID, CENTROS DOCENTES EN MADRID y LIFE my Building is Green

### RESUMEN

En este trabajo se presentan diferentes experiencias de monitorización de edificios que ha llevado a cabo el grupo de investigación Sistemas Constructivos y Habitabilidad de Edificios del Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (SCHE-IETcc-CSIC), en los últimos años. Algunos de los edificios monitorizados forman parte de Proyectos de I+D+i, nacionales, como el proyecto REFAVIV, ya finalizado; e internacionales, como el proyecto europeo LIFE My Building is Green, que actualmente está en proceso de desarrollo. Otros casos de monitorización forman parte de experiencias del grupo SCHE, previas a la presentación de proyectos en convocatorias de investigación, como el estudio sobre la calidad del aire interior y las condiciones ambientales de tres centros docentes en Madrid. En cada uno de los apartados de los proyectos se describen diferentes propuestas y equipos de monitorización de los edificios.

**Palabras clave:** Monitorización de edificios; REFAVIV, Viviendas; Escuelas; Proyecto LIFE UE

## *Monitoring of buildings of the SCHE - IETcc - CSIC Group. Projects: REFAVIV, 4 DWELLINGS IN MADRID, EDUCATIONAL CENTERS IN MADRID and LIFE my Building is Green*

### ABSTRACT

*This work describes different recent experiences of building monitoring developed by the research group "Building systems and habitability (SCHE)" in the Eduardo Torroja Institute for Construction Science (IETcc), that belongs to the Spanish National Research Council (CSIC). Some of the buildings monitored are part of national R+D+i projects, such as the REFAVIV project, which has already been completed. International projects are also presented, such as the European project LIFE My Building is Green, currently under development. Other monitoring cases are part of SCHE group's experiences, previous to the presentation of projects in research calls, such as the study on indoor air quality and environmental conditions in three schools in Madrid. Each section of these document describes different approaches and equipments for building monitoring.*

**Keywords:** *Monitoring of buildings; REFAVIV, Dwelling, Schools. UE LIFE project*

## 1. Introducción

Se presenta en este trabajo la descripción de la monitorización de diferentes edificios, en diferentes proyectos de investigación, en los que ha participado el grupo de investigación de Sistemas Constructivos y Habitabilidad en Edificación (SCHE) del Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (IETcc) del Consejo Superior de Investigaciones (CSIC), en los últimos 6 años.

Los proyectos de investigación que se describen en el trabajo son:

1. REFAVIV- “Rehabilitación energética de las fachadas de viviendas sociales deterioradas en Madrid y Sevilla, aplicando productos innovadores nacionales y europeos (DIT y DITE)”- BIA-2012-39020-C02-01 -MINECO (1/2013-6/2016).  
IP: I. Oteiza
2. CUATRO CASOS DE ESTUDIO DE VIVIENDAS EN MADRID. Este apartado es parte del estudio del proyecto REFAVIV. BIA-2012-39020-C02-01 -MINECO (1/2013-6/2016). IP: I. Oteiza
3. CENTROS DOCENTES EN MADRID- Es un estudio que realizó el grupo de investigación de Sistemas Constructivos y Habitabilidad del Edificios del IETcc, en tres centros docentes, como análisis previo para participar en una convocatoria de un proyecto de I+D+i de proyectos nacionales.
4. Proyecto LIFE myBUILDINGisGREEN (LIFE mBiG) - Soluciones Basadas en la Naturaleza para la adaptación de edificios al Cambio Climático, LIFE17 CCA/ES/000088 (09/2018-09/2022). Proyecto Europeo Coordinado por el CSIC, IP: J. Muñoz del Real Jardín Botánico de Madrid. En el que participa el grupo SCHE-IETcc, con B. Frutos como IP del Instituto CC E. Torroja y como socios: Fundación CARTIF- Centro Tecnológico, Cámara Municipal de Porto, CIMAC- Comunidad intermunicipal do Alentejo Central (Portugal) y CIPBA- Diputación de Badajoz.

A continuación, se describe de cada uno de los proyectos, las características de los edificios monitorizados, las diferentes instalaciones y equipos, así como algunos de los datos que se han obtenido. En cada apartado se presentan algunas conclusiones, si este proyecto ya se terminó. Al final se presenta un apartado

con una breve bibliografía o referencias en las que se puede profundizar de los proyectos expuestos. Las gráficas, datos de la metodología y aquellas conclusiones que se indican en este trabajo en su mayoría han sido tomadas de artículos y referencias que se indican al final y no pretenden ser resultados originales del estudio.

## 2. REFAVIV.

### BIA-2012-39020-C02-01 - (2013-2016)

“Rehabilitación energética de las fachadas de viviendas sociales deterioradas en Madrid y Sevilla, aplicando productos innovadores nacionales y europeos (DIT y DITE)”

Este proyecto surge ante la ineficiencia energética en el extenso parque de viviendas sociales existente, construido en España entre 1940 y 1980, periodo caracterizado por la inexistencia de normativa sobre ahorro de energía y acondicionamiento térmico, así como por los escasos medios con los que se contaba, ante la urgencia de resolver cuestiones prioritarias de índole social.

Como parte del proyecto de investigación REFAVIV (1), se han caracterizado los sistemas constructivos de la envolvente opaca de una importante muestra de promociones de viviendas sociales multifamiliares. Estas viviendas se construyeron antes de las primeras Normas Españolas NBE-CT 79. En el año 2001, en Madrid (INE. Censo 2001), el 68% de las viviendas principales se habían construido en el periodo entre 1940 y 1980 y la mayor parte de estas viviendas fueron construidas en la década de 1960, cerca del 29% en aquellos años estas viviendas estaban en la periferia de la ciudad, pero actualmente están en el área urbana central de la ciudad. (Fig 1).

El estudio experimental de la investigación estaba conformado, por una parte donde se analizaban los consumos energéticos y las condiciones higrotérmicas de varias viviendas en Madrid y en Sevilla, y otra parte de investigación con módulos experimentales, donde se estudiaron de forma controlada diferentes variables higrotérmicas y de consumo energético en 3 módulos experimentales, esto se presenta en el apartado GT 2.

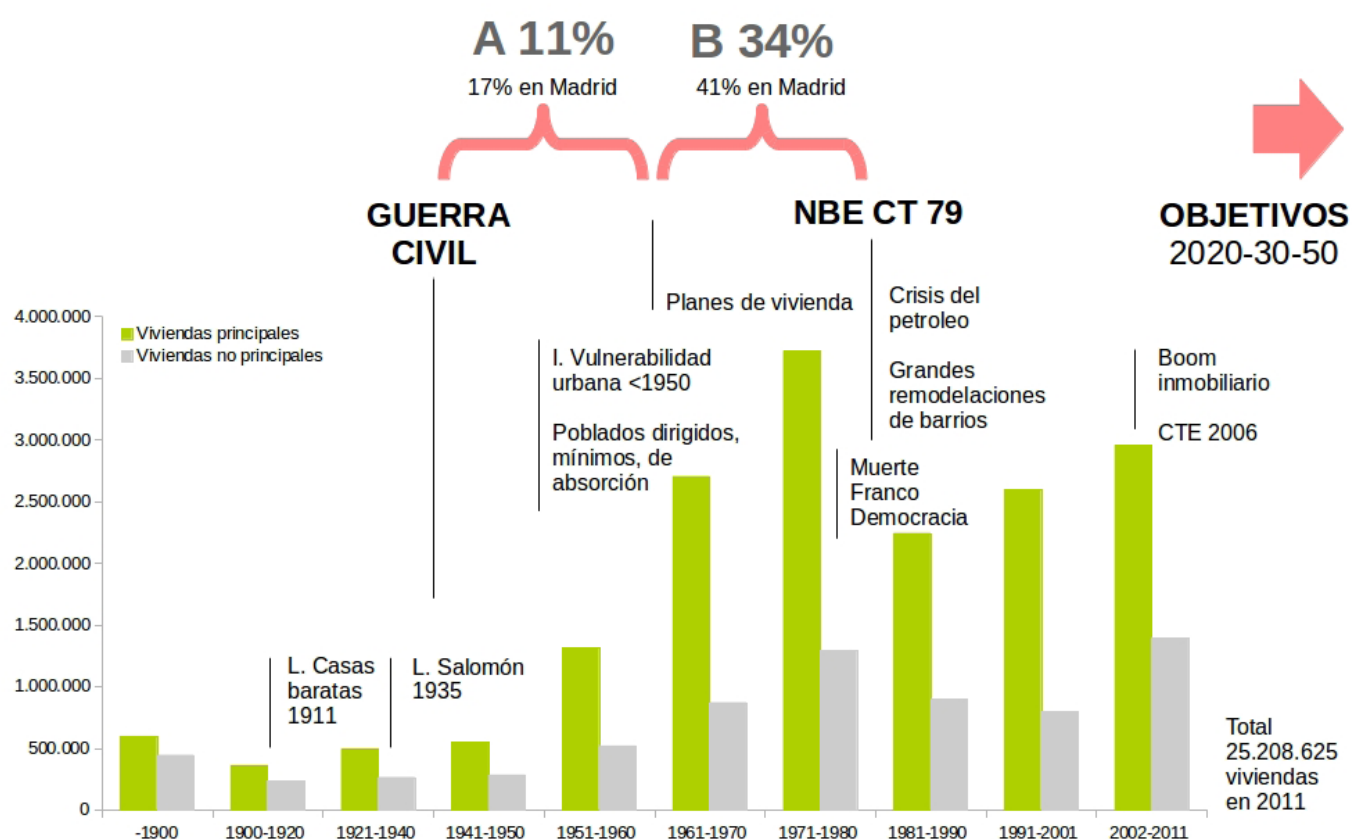


Fig 1. N0mero de viviendas en Espa1a (Censo 2011) e hitos

## Metodolog0a

Se realiz3 un estudio de los diferentes barrios de Madrid, con una muestra total de 75, de estos se han seleccionado dos viviendas tipo, vivienda A y vivienda B, en el barrio de Manoteras, en la zona noreste de Madrid. Pertenecen a los dos periodos diferenciados por d0cadas, A. De 1940 A 1960 y la B de 1960 a 1980. Las fachadas son de doble hoja, una m1s pesada que otra, pero ninguna tiene aislamiento incorporado (2).

La vivienda A forma parte de la promoci3n del Poblado Dirigido de Manoteras de 1957. La vivienda B es una promoci3n de la Obra Sindical del Hogar, del a1o 1967 (Fig 2).

Se han realizado medidas en el exterior (Temperatura, Humedad Relativa) y en el interior de las viviendas (Fig 3) de Temperatura, Humedad Relativa y Concentraci3n de CO<sub>2</sub>. Se utiliz3 una estaci3n meteorol3gica para controlar el microclima local, y se han realizado algunos ensayos puntuales con equipos especializados, como el ensayo de "Puerta soplante", im1genes termogr1ficas.

Otra fuente importante de datos son las entrevistas y encuestas con los ocupantes y la revisi3n de consumos energ0ticos facturados, que tambi3n se han incluido en el an1lisis. La frecuencia de toma de datos se han teniendo en cuenta la necesidad de datos sub-horarios, atendiendo y ajust1ndolos a la capacidad de los equipos en el caso de las viviendas, por lo general cada 10 minutos.



Fig 2. Vistas a0reas del barrio de Manoteras- Madrid



Además de las encuestas, y mediciones del ambiente interior (Ti, HR, CO<sub>2</sub>) (Fig 4 ), se realizaron termografías, consumo eléctrico (cada 10 minutos) de los diferentes equipo (Fig 6) y de calefacción en los periodos de invierno ( Fig 5).

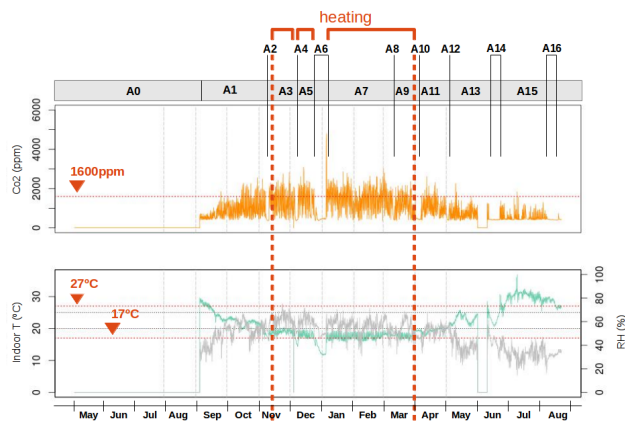


Fig 3. Mediciones anuales de concentración de CO<sub>2</sub>, temperatura (Ti) y humedad (HR) de las 2 viviendas de Manoteras A y B (Madrid)

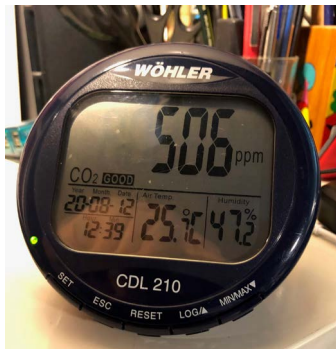


Fig4. Medidor Wöhler (T, Hr, CO<sub>2</sub>) y Fig 5. Caudalímetro-medidor de energía



Se determinó la distribución total y porcentual de los consumos energéticos de las viviendas A y B (Electricidad, ACS y Calefacción) (Fig. 7).

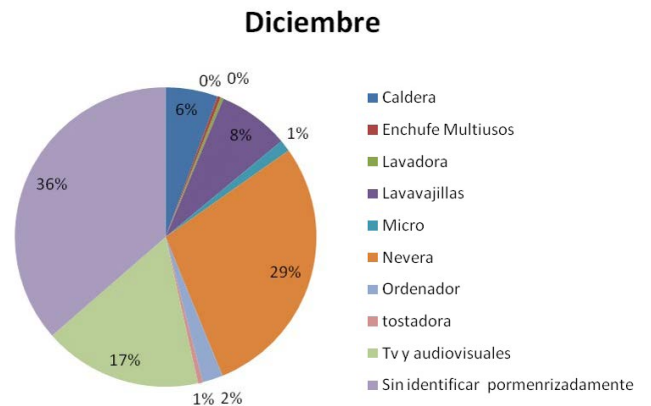


Fig 6. Consumos eléctricos VIVIENDA A en el mes de diciembre de 2014. Diferentes equipos



GRÁFICOS CON LOS DATOS DEL AUTOR -2015

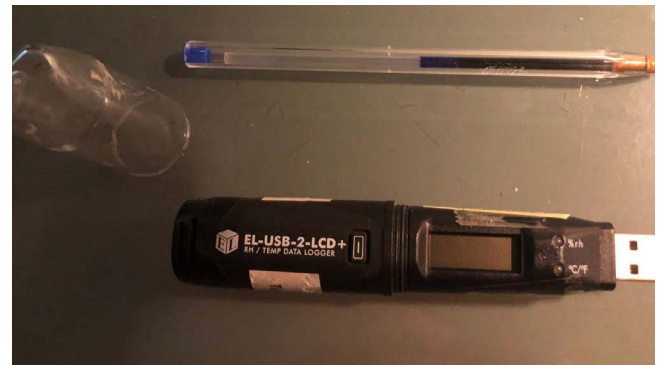


Fig 8. Equipo Lascar EL-USB-2-LCD para toma de datos de T y HR

Entre las conclusiones del trabajo, se señala que las intervenciones en los edificios con mayor deterioro y probablemente antigüedad, tendrán un mayor impacto en cuanto al ahorro energético, a la mejora del confort y a las mejoras sociales de la población.

### 3. Cuatro casos de estudio de viviendas en madrid

Este estudio es un apartado del proyecto de investigación REFAVIV (1), donde se han caracterizado los sistemas constructivos de la envolvente opaca de una importante muestra de promociones de viviendas sociales multifamiliares. Con el objetivo de analizar las condiciones de confort de estas viviendas y proponer futuras mejoras en una rehabilitación, se han monitorizado las condiciones ambientales interiores de varias viviendas (2 en el barrio Manoteras de Madrid, 3 en Sevilla y 4 viviendas en otras zonas de Madrid) para lo que se ha hecho un seguimiento de las condiciones higrotérmicas (temperatura interior y de la humedad) durante más de 24 meses (2014-2016). En estas 4 viviendas se ha caracterizado de forma experimental la fachada, para conocer las pérdidas de energía a través de la envolvente (4).

#### Metodología

Este estudio corresponde a la muestra de 4 viviendas de diferentes promociones, ubicadas en la ciudad de Madrid, construidas en los años 50/60 del siglo pasado.

El equipo que se utilizó para la monitorización fue un termohigrómetro. En cada una de las viviendas se colocó en el área social de la misma y a una altura aproximada de 1,5 m el termohigrómetro tipo Lascar EL-USB-2-LCD, para el registro de la temperatura (T) y de la humedad relativa (HR) (Fig 8), la toma de datos se realizó cada 30 minutos, durante 26 meses (desde agosto de 2014 hasta noviembre de 2016). Las características del termohigrómetro digital: Temperatura: Rango de medición -35 ° C a 80 ° C Resolución interna-0,5 ° C. Humedad relativa: Rango de medición 0 a 100% de HR. Resolución interna 0,5% RH

Para calcular transmitancia de la envolvente opaca de forma experimental se utilizó el fluxómetro. Para las

imágenes termográficas (invierno 2016), Se utilizó una cámara Termográfica FLIR B335.

Entre los objetivos del trabajo, uno de ellos fue el de caracterizar la envolvente opaca y el comportamiento ambiental del espacio interior de las 4 viviendas con la menor cantidad de equipos de medición y de la manera más sencilla posible.

En la Fig. 9 se muestra una parte de la tabla con la caracterización de las envolventes de las viviendas y en la Fig. 10, las gráficas en de las temperaturas en invierno y en verano, donde se aprecian las oscilaciones de cada una de las viviendas

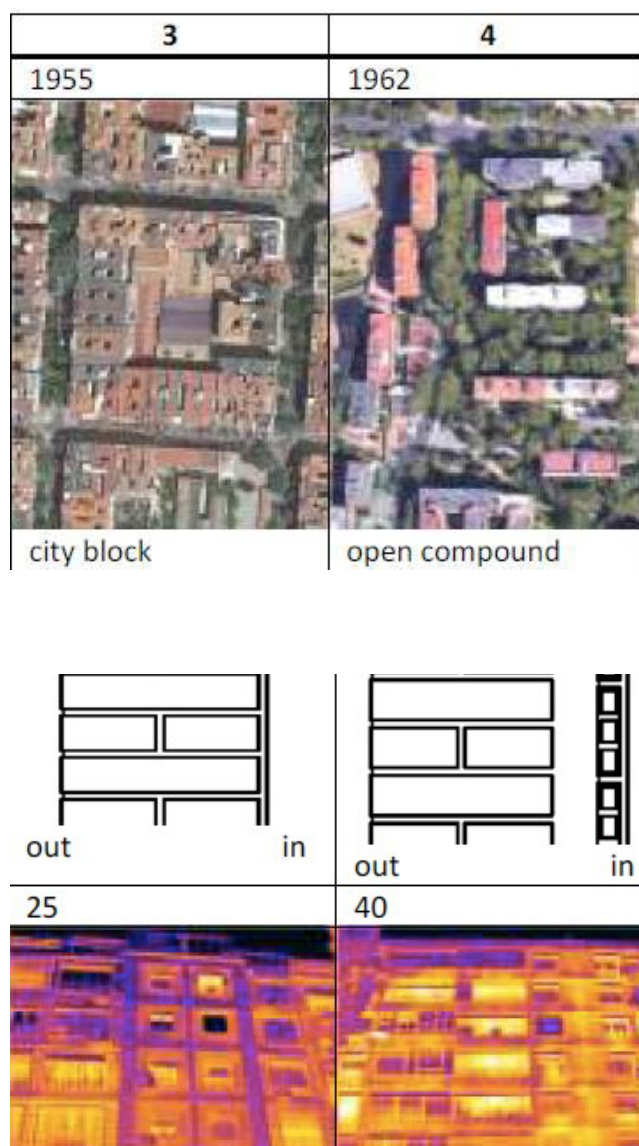


Fig 9. Vista aérea (Google Earth), sección de la fachada y termográfica, de las viviendas 3 y 4

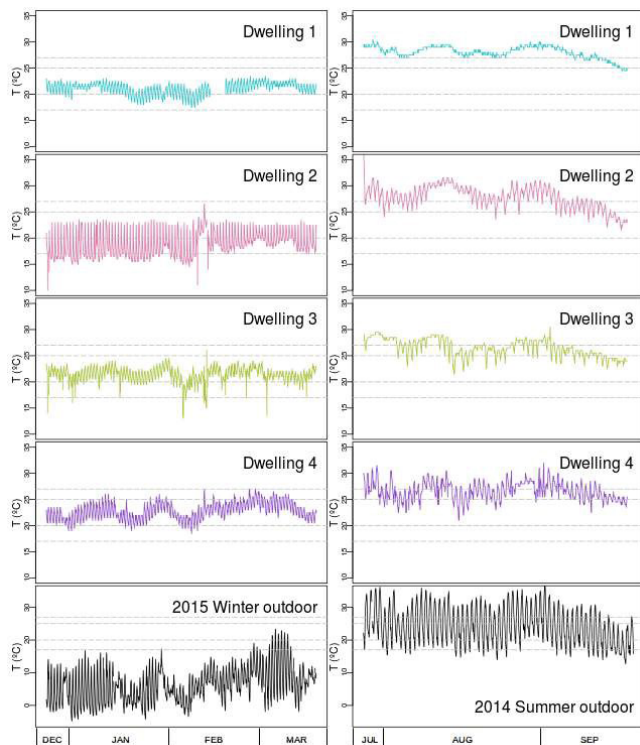


Fig 10. Temperatura en el interior de cada vivienda (casos 1, 2, 3 y 4) en los meses de invierno (izquierda) y verano (derecha) y Temperatura exterior en esos meses

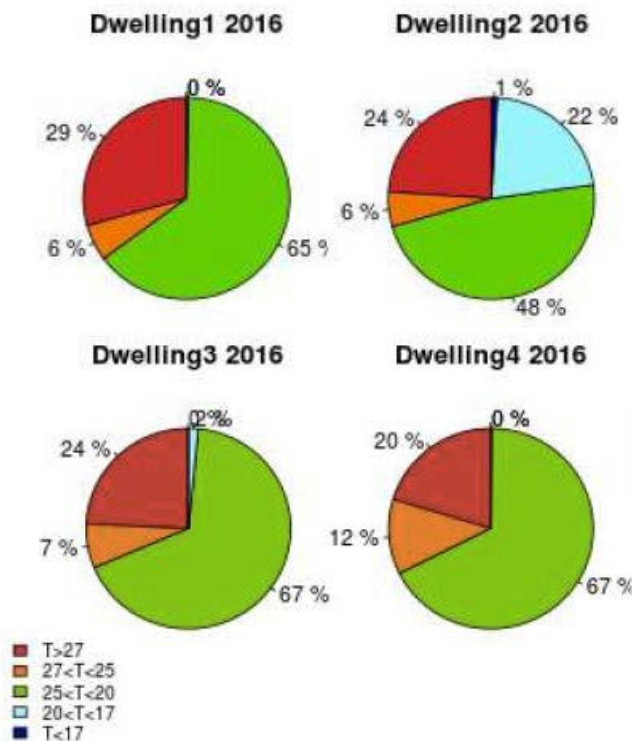


Fig 11. Distribución anual de las temperaturas en el interior de las viviendas 1, 2, 3 y 4

Entre las conclusiones de este estudio, cabe destacar que las construcciones de edificios residenciales de esta época (1950-1980), las condiciones de confort son peor en verano (entre un 20-24% del año la temperatura interior está por encima de los 27°C), que en invierno (menos del 5% del tiempo la temperatura interior está por debajo de los 17°C), fundamentalmente porque las viviendas cuentan mayoritariamente con sistemas de calefacción para el invierno (3) y no disponen de sistemas pasivos ni activos para las altas temperaturas del verano en Madrid.

El uso de medidas pasivas durante el verano es una práctica común de los usuarios (toldos, persianas, ventilación nocturna). En invierno, sin embargo, los ocupantes dependen de la calefacción para garantizar la comodidad. Es previsible que la falta de confort durante el verano (Fig. 11), además del cambio climático esperado, aumente el consumo debido a la instalación de equipos de refrigeración.

Los bajos niveles de humedad en estas unidades hacen que el enfriamiento por evaporación sea una buena opción pasiva para reducir la temperatura del verano. La energía utilizada en el invierno seca el medio ambiente. Tales alteraciones sustanciales en los niveles de HR respaldan el argumento para usar un indicador de entalpía para la caracterización de la energía

#### 4. Centros docentes en Madrid

Este trabajo se trata de la evaluación de las condiciones higrotérmicas y de calidad del aire de centros docentes en Madrid. Para lo cual se tomaron datos de concentración de CO<sub>2</sub>, temperatura y humedad relativa en un total de nueve aulas que pertenecen a tres centros docentes públicos durante un año. El objetivo fue analizar la situación, determinar las causas que influyen en las condiciones de confort de las aulas y ofrecer medidas para corregir las desviaciones registradas y mejorar la calidad del ambiente interior en las aulas. Como resumen del estudio se elaboró un artículo que está en proceso para su publicación titulado “Evaluación del confort higrotérmico y la calidad de aire en centros docentes públicos en Madrid. Estudio de tres casos durante un año” (4).

## Metodología

El estudio se centró en tres centros docentes públicos:

- Centro A- Colegio de educación primaria, año de construcción: 1967, 200 alumnos, superficie de 3010 m<sup>2</sup>. Envoltorio opaco de una sola hoja sin aislamiento, ventanas de aluminio sin rotura de puente térmico y vidrio sencillo de 3 mm
- Centro B- Instituto de Educación Secundaria (Formación Profesional), año de construcción: 1965, 800 alumnos y una superficie de 9742 m<sup>2</sup>. Envoltorio exterior de muro cortina de vidrio. Carpintería de aluminio sin rotura de puente térmico, vidrio doble 3/6/3 mm
- Centro C- Instituto de Educación Secundaria (ESO y Bachillerato), Año de construcción 2010, 700 alumnos y una superficie de 7166 m<sup>2</sup>. Envoltorio exterior de dos hojas (hoja exterior ladrillo perforado, aislamiento térmico en cámara intermedia y bloque de doble hueco al interior enfoscado), ventanas con rotura de puente térmico con vidrio doble de 4/6/6 mm

En cada centro se monitorizaron 3 aulas con diferente ubicación, según su orientación y según el nivel en el edificio. Ninguno de los centros docentes cuenta con sistema de ventilación mecánica. En todos los casos la ventilación se realiza de forma manual mediante la apertura de ventanas.



Fig 12. Registrador de datos CDL 210 utilizado en la toma de datos

La toma de datos de concentración de CO<sub>2</sub>, temperatura y humedad relativa se obtienen con un solo equipo, con registradores de datos CDL 210 de la marca Wöhler. (Fig. 12) Con un rango de medición de temperatura entre -10°C y +60°C con una precisión de ±0.6 % y una resolución de 0.1°C. Ofrecen un rango de medición de humedad relativa entre 5% y 95% con una precisión de ±3% y una resolución de 0.1%. Se han tomado datos cada 15 minutos durante un año, entre los meses de octubre de 2017 y septiembre de 2018. Estos datos se han descargado de forma periódica y manual, en un ordenador.

Los resultados obtenidos según las variables analizadas han sido:

- Sobre el contenido de CO<sub>2</sub> (Fig. 13): Los valores medios mensuales más altos se obtienen en el mes de enero, mientras que los valores más bajos se obtienen en mayo.
- Sobre la temperatura y humedad relativa en las aulas (Fig. 14): Los valores medios mensuales más altos se obtienen en el mes de octubre, mientras que los valores más bajos se obtienen en enero, si no tenemos en cuenta los meses de julio y agosto que no son lectivos.

En la Fig. 15 se muestra el porcentaje de horas en las que cada aula se encuentra por debajo de la temperatura de confort marcada por el RITE, dentro de los valores de temperatura de confort y por encima de dichos valores. Se diferencia temporada de invierno y temporada de verano dado que el RITE identifica valores de temperatura de confort diferentes para cada temporada. Se considera temporada de invierno aquella en la que está funcionando el sistema de calefacción, de noviembre a abril. Se considera temporada de verano aquella en la que no está funcionando el sistema de calefacción, de mayo a octubre.

Los datos reflejan que el 78% de las aulas se mantienen más de un 20% de las horas por encima de la temperatura máxima de confort. Dicho sobrecalentamiento puede deberse a que las instalaciones de calefacción de los colegios adolecen de un adecuado sistema de regulación, que sea capaz de detener las emisiones de calor cuando se alcanza la temperatura de consigna.

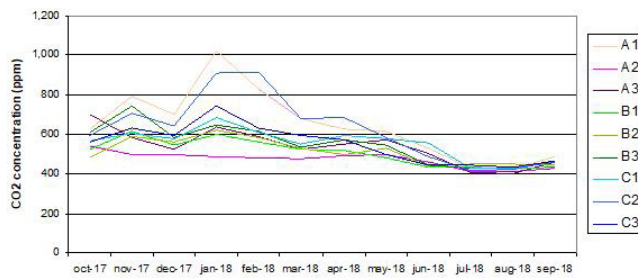


Fig 13. Valores medios mensuales de concentración de CO<sub>2</sub> en cada aula (ppm)

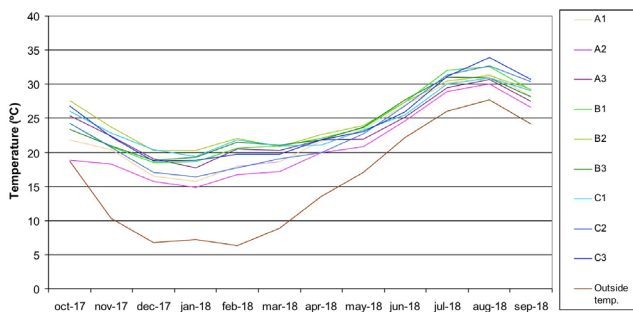


Fig 14. Valores medios mensuales de temperatura en cada aula (ppm)

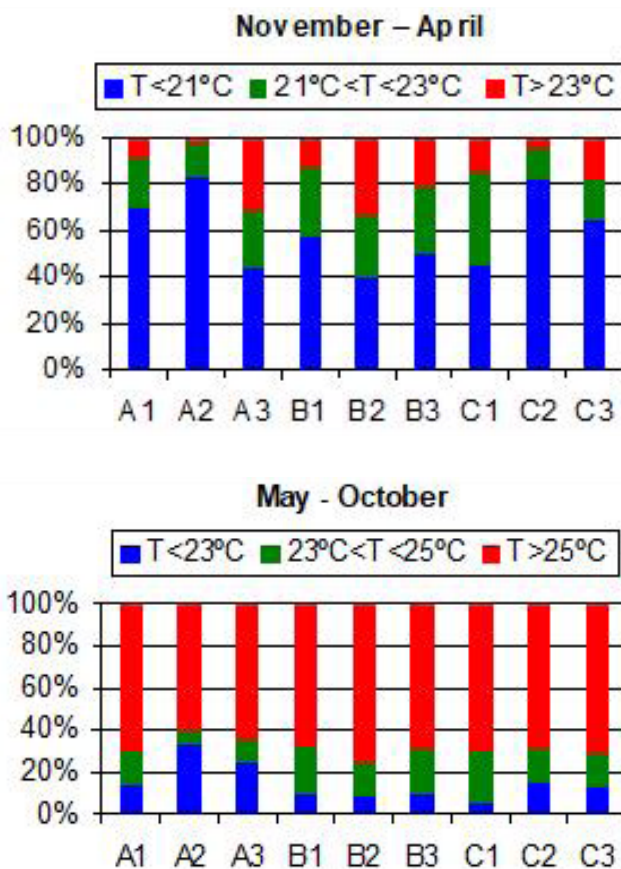


Fig 15. Porcentaje de horas por debajo de la temperatura de confort (>21°C), dentro de la temperatura de confort y por encima de dicha temperatura (<25°C) a lo largo del año

La mayor estanqueidad de las carpinterías del centro C y la mayor ocupación de sus aulas, influyen en que la concentración de CO<sub>2</sub> sea mayor en dicho centro. También el hecho de contar con cerramientos opacos y huecos transparentes, ambos con transmitancias térmicas más bajas, junto con su mayor ocupación influyen en que obtenga mayor sobrecalentamiento en verano.

Como conclusión, en cuanto a los resultados de concentración de CO<sub>2</sub> en las distintas aulas, se puede afirmar que el factor determinante no es tanto las características constructivas del centro educativo ni el número de alumnos presentes en cada aula, que sin duda influyen, sino del uso de la ventilación natural mediante la apertura de las ventanas que se realiza en cada aula. Los peores valores se obtienen en un aula de cada colegio mientras que otras aulas del mismo centro obtienen unos resultados más positivos.

Cabe destacar que el colegio C, construido en 2010 cuyas carpinterías cuentan con mayor estanqueidad y cuya ocupación por aula es mayor, obtiene peores resultados frente a las concentraciones de CO<sub>2</sub>, mientras que los otros dos centros cuyas carpinterías son menos estancas obtienen unos resultados mejores.

#### 4. Proyecto LIFE myBUILDINGisGREEN

El Proyecto LIFE myBUILDINGisGREEN (LIFE17 ENV/ES/000088. Application of Nature-Based Solutions for local adaptation of educational and social buildings to Climate Change), en adelante el Proyecto LIFE mBiG, es un proyecto europeo de la convocatoria LIFE (años 2018-2022) en el que participa el CSIC con sus centros IETcc y R. J. Botánico. Su objetivo es aumentar la resiliencia en edificios mediante la implementación de Soluciones Basadas en la Naturaleza (NBS) como prototipos de adaptación climática y mejora del bienestar de los usuarios de los mismos, principalmente en los meses calurosos.

Como NBS, se contemplan, entre otras, cubiertas verdes, estructuras verticales con vegetación para sombrear huecos, ventilación natural, pavimentos drenantes y arbolado exterior. En su primera fase se han estudiado las condiciones de confort de los edificios. Las

monitorizaciones han servido también para calibrar un modelo de comportamiento energético (DesignBuidier) con el que se estudian los comportamientos de las NBS y se ajustan los diseños a los edificios demostradores (Colegios públicos: 1- Badajoz, 2- Evora, 3-Oporto). En la segunda fase se ejecutarán las obras de implementación de las NBS y se realizará una monitorización de un año para comprobar los efectos reales de las soluciones sobre las condiciones de confort.

En este apartado se muestran los estudios de monitorización que acompañarán las distintas fases de desarrollo proyecto (6).

### Metodología

Los tres centros educativos seleccionados como “laboratorios verdes” están ubicados respectivamente en Badajoz, Évora y Oporto (Fig. 16).

La elección de los centros educativos partió de una matriz de selección, conformada por una serie de características que debían cumplir los colegios. Estas se agrupaban en tres bloques: características constructivas, poblaciones pequeñas u otras cuestiones, como la disponibilidad de wifi para facilitar la transferencia de datos de la monitorización.

En cuanto a las características constructivas, en general, comunes en los tres edificios, constaba de lo siguiente:

- Año de construcción anterior a la normativa NBE-CT-79, en el caso de España y su correspondencia en el caso de Portugal.
- Cubierta plana, en buen estado de conservación, preferiblemente acabada con grava, como es el caso de Badajoz, o panel sándwich como el caso de Évora.
- Fachada que posibilite la colocación de anclajes.
- Disponibilidad de espacio perimetral en el exterior para permitir la instalación de elemento auxiliares.

Se han usado equipos Testo 160 IAQ (Fig. 17) para registrar temperatura, humedad relativa, concentración de CO<sub>2</sub> en el interior de cada aula, y de temperatura, humedad relativa y presión barométrica en el exterior del edificio. Los sensores poseen las siguientes características: Temperatura (Precisión:  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ ; resolución:  $0,1^{\circ}\text{C}$ . Humedad relativa (precisión:  $\pm 3\%$ ; resolución:  $0,1\%$  HR. Concentración de CO<sub>2</sub> (Precisión:  $\pm 3\%$ ; resolución: 1ppm. El registro se ha programado para periodos de 15 minutos.

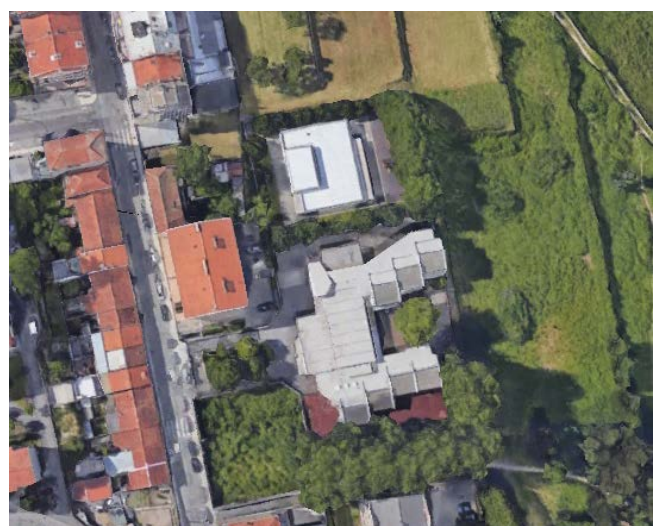


Fig 16. (a) Colegio en Solana de los Barros, Badajoz, Spain. (b) Colegio en Horta das Figueiras, Évora, Portugal. (c) Colegio en Mello Falcão, Oporto, Portugal. Google Maps



Fig 17. Registrador de datos Testo 160 IAQ utilizado en la toma de datos

La ubicación de los sensores se ha distribuido como sigue:

- En Badajoz se instalaron, en mayo de 2019, 6 sensores en el interior (1 en el edificio antiguo –que no es intervenido- a modo de referencia, 2 en la planta baja y 3 en la planta primera), y 2 en el exterior (fachadas este y oeste), desde septiembre de 2019.
- En Évora se instalaron 5 sensores en el interior (3 en la planta baja y 2 en la planta alta), y 2 en el exterior (fachadas sur y oeste), en enero de 2020.
- En Oporto se instalaron, 6 sensores en el interior (3 en planta baja y 2 en la planta alta), asimismo se ubicaron otros 2 en el exterior (fachadas norte y sur).

Se han detectado algunas anomalías en la transmisión de datos a la base wifi que deberán ser subsanadas:

Como ejemplo del proyecto, se dan algunas gráficas relativas al estudio del colegio de Badajoz.

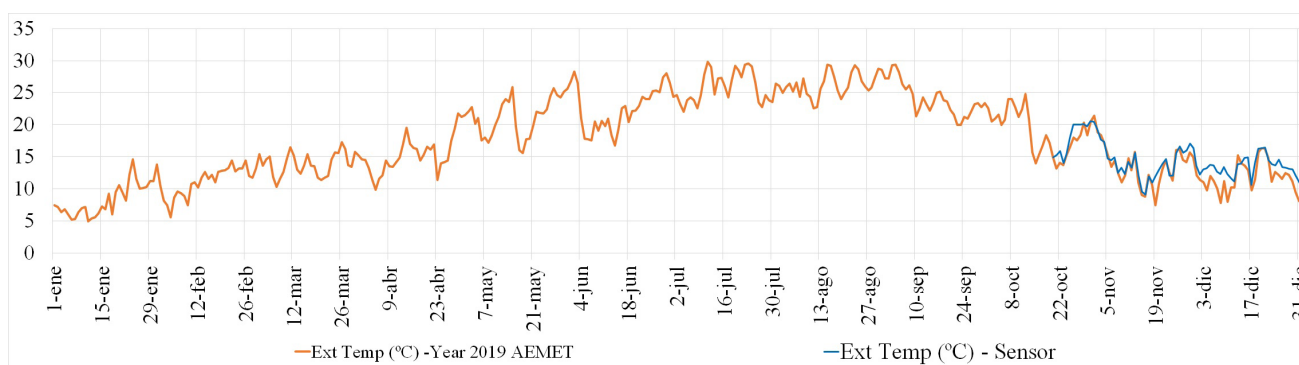


Fig. 18. Temperatura exterior, datos de un año tipo, determinado por la media de temperatura exterior de los últimos 10 años (base de datos SWEC de EnergyPlus), del año completo 2019 (AEMET) y de los datos monitorizados (últimos meses de 2019).

En la gráfica anterior (Fig18) pueden determinarse dos cuestiones del análisis de la temperatura exterior de un año completo: Por un lado, la coincidencia entre la temperatura exterior monitorizada con la del observatorio de AEMET más cercano a la ubicación del colegio; y por otro lado, la identificación de los picos de temperatura correspondientes a las olas de calor, entre año real (AEMET) y el año tipo (SWEC).

Respecto a los datos recogidos por los sensores de las aulas, se muestra a continuación una compara-

tiva de dos aulas orientadas al este en ambos casos, una vacía (izquierda) y otra ocupada (derecha). En ella puede verse reflejado (parte derecha) el incremento de CO<sub>2</sub> en el interior del aula producido por la actividad humana (en este caso por los alumnos, durante las horas lectivas), alcanzando valores máximos de 1280ppm. Así mismo, en ambas gráficas se observan altas temperaturas en el interior de las aulas, con valores máximos de 32°C.

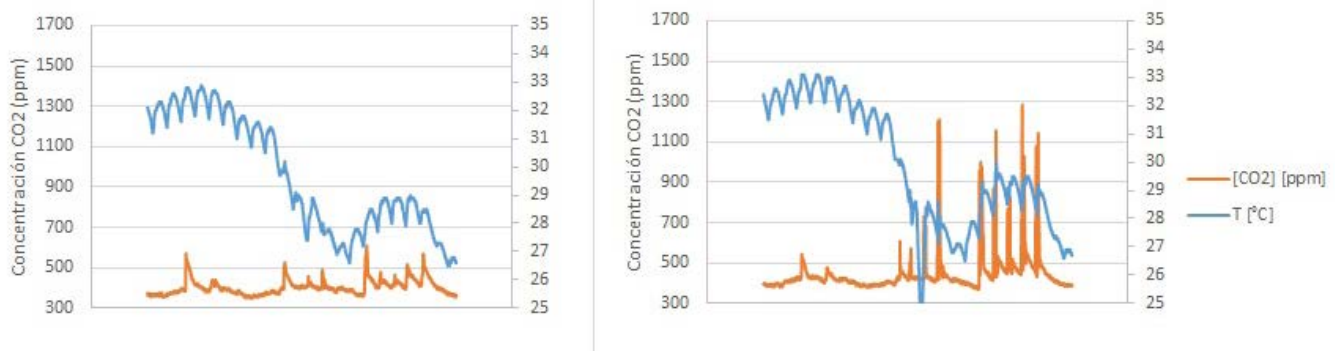


Fig 19. Comparativa de datos horarios de confort (Temperatura y CO<sub>2</sub>), durante un mes lectivo de verano, entre un aula vacía -izq-, aula ocupada -drcha.-ambas orientadas al este

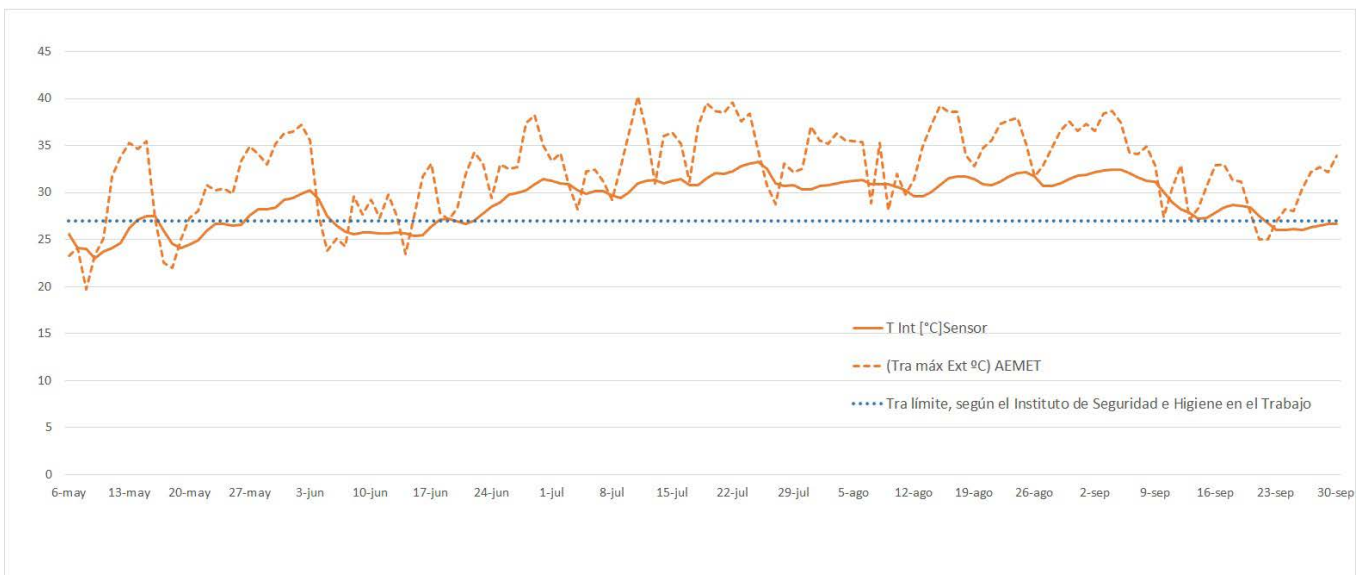


Fig 20. Temperatura interior promedio diaria del sensor ubicado en el aula de referencia, mayo a septiembre 2019

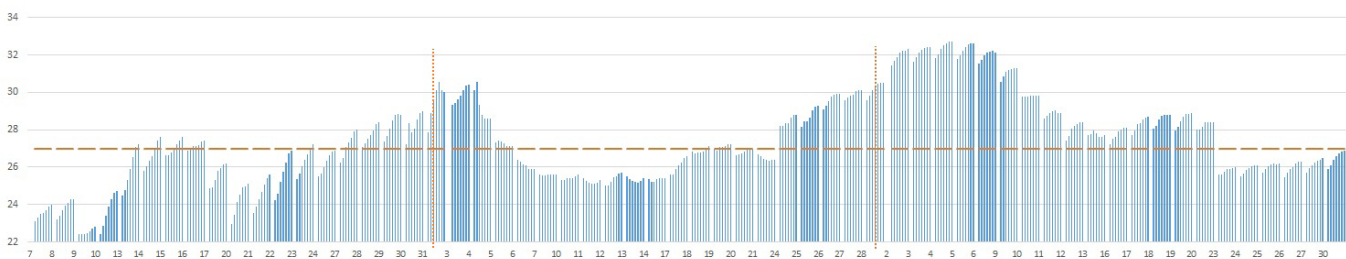


Fig 21. Horas en disconfort en el período lectivo. De 9:00 a.m. a 3:00 p.m., de lunes a viernes, durante mayo, junio y septiembre



En cuanto a la temperatura interior de un aula de referencia, se analizó el número de horas en disconfort. En la gráfica siguiente (Fig. 20) se puede observar el promedio diario de la temperatura interior que sobrepasa los 27°C de temperatura máxima establecida para un trabajo sedentario según las directrices del Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo.

De dichos datos monitorizados para el aula de referencia, se obtienen el número de horas lectivas en disconfort. (Fig. 21), resultando un porcentaje para el mes de mayo del 36,09% de horas por encima de la temperatura límite mencionada, un 45% para el mes de junio y un 71,43% en el mes de septiembre.

## 5. Agradecimientos

Al Proyecto REFAVIV - “Rehabilitación energética de las fachadas de viviendas sociales deterioradas en Madrid y Sevilla, aplicando productos innovadores nacionales y europeos (DIT y DITE)”- BIA-2012-39020-C02-01 –Ministerio de Economía y Competitividad de España-MINECO (1/2013-6/2016). Y al proyecto europeo convocatoria LIFE myBUILDINGisGREEN (LIFE17 ENV/ES/000088. Application of Nature-Based Solutions for local adaptation of educational and social buildings to Climate Change).

## 6. Referencias de los proyectos

### PROYECTO REFAVIV

- (1) Alonso, C. (2015). Rehabilitación energética de fachadas. Propuesta metodológica para la evaluación de soluciones innovadoras, basándose en el diagnóstico de viviendas sociales de 1940-1980. Tesis Doctoral Universidad Politécnica de Madrid.
- (2) Oteiza, I.; Alonso, C.; Martín Consuegra, F.; Monjo, J.; González, M. (2018). La envolvente energética de la vivienda social en el caso de Madrid en el periodo 1939-1979. Editorial CSIC. <https://editorial.csic.es/publicaciones/libros/13121/978-84-00-10454-2/la-envolvente-energetica-de-la-vivienda-social-el-.html>
- (3) Alonso, C.; Oteiza, I.; Martín-Consuegra, F.; Frutos, B. (2017). Methodological proposal for monitoring energy refurbishment. Indoor environmental quality in two case studies of social housing in Madrid, Spain. Energy and Buildings. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.09.042>

### CUATRO CASOS DE ESTUDIO DE VIVIENDAS EN MADRID

- (4) Oteiza, I.; Martín Consuegra, F.; Alonso, C.; Frutos, B.; Martín S (2017). Analysis of comfort in Multy-family housing in Madrid Spain (1940-1980). Four case studies monitored for energy rehabilitation. PLEA 2017 Edinburgh- UK

### CENTROS DOCENTES EN MADRID

- (5) Gallego Sánchez-Torija, J.; Arranz, B.; Oteiza, I.; Alonso, C.; Martín Consuegra, F. (2020). Evaluación del confort higrotérmico y la calidad de aire en centros docentes públicos en Madrid. Estudio de tres casos durante un año. (En proceso de publicación en una revista científica).

### Proyecto LIFE myBUILDINGisGREEN (LIFEBiG)

- (6) Gómez, G., Frutos, B., Alonso, C., Martín-Consuegra, F., Oteiza, I., Castellote, M., Muñoz, J., Torre, S., Feroso, J., Torres, T., Antón, M.A., Batista, T., Morais, N. (2020). Prediction of thermal comfort and energy behaviour through Natural Based Solutions implementation. Case study in

Badajoz (Spain). (En proceso de publicación en el Congreso “Eco-Architecture 2020: 8th International Conference on Harmonisation between Architecture and Nature”).

# Análisis Experimental de Edificios en la Unidad de I+D UiE3 del CIEMAT

Objetivos, metodologías y aplicaciones

UNIDAD DE I+D SOBRE EFICIENCIA ENERGÉTICA EN LA EDIFICACIÓN (UiE3). CIEMAT

S. Soutullo (1), M.N. Sánchez (2), R. Olmedo (3), H. López (4), A. Castellanos (5), O. Seco (6), R. Enríquez (7), M.R. Heras (8), M.J. Jiménez (9)

(1) Dr. Arq. Investigador. Sistemas constructivos y Habitabilidad en (1,8, 9) Dra. CC. Físicas. Unidad de I+D sobre Eficiencia Energética en la Edificación del CIEMAT, Madrid.

(2) Dr. Ingeniero Industrial. Unidad de I+D sobre Eficiencia Energética en la Edificación del CIEMAT, Madrid.

(3) Ingeniero Técnico Industrial. Unidad de I+D sobre Eficiencia Energética en la Edificación del CIEMAT, Madrid.

(4) Arquitecta Técnica. Unidad de I+D sobre Eficiencia Energética en la Edificación del CIEMAT, Madrid.

(5) Ingeniero Industrial. Unidad de I+D sobre Eficiencia Energética en la Edificación del CIEMAT, Madrid.

(6) Dr. CC. Químicas. Unidad de I+D sobre Eficiencia Energética en la Edificación del CIEMAT, Madrid.

(7) Dr. CC. Físicas. Hasta julio de 2018. Unidad de I+D sobre Eficiencia Energética en la Edificación del CIEMAT, Madrid.

Persona de contacto/Corresponding author: mjose.jimenez@psa.es (M.J. Jiménez)

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5441-5346> (M.J. Jimenez); <http://orcid.org/0000-0001-6420-2734> (S. Soutullo); <http://orcid.org/0000-0002-0704-2989> (M.N. Sánchez); <http://orcid.org/0000-0002-7803-2278> (R. Olmedo); <http://orcid.org/0000-0001-5753-9363> (R. Enríquez); <http://orcid.org/0000-0001-8623-7479> (M.R. Heras)

## Análisis Experimental de Edificios en la Unidad de I+D UiE3 del CIEMAT: Objetivos, metodologías y aplicaciones

### RESUMEN

La evaluación experimental del edificio se realiza a través de la medida de su respuesta energética ante fluctuaciones exteriores e interiores. La aplicación de este tipo de metodologías permite conocer el comportamiento real del edificio, identificando los flujos más relevantes y posibilitando la optimización global del sistema para lograr un edificio de bajo consumo energético. Este tipo de herramientas permite afrontar los retos de las ciudades hacia una transición energética baja en carbono. La Unidad de Eficiencia Energética en la Edificación del CIEMAT tiene una amplia experiencia en la monitorización de edificios. En los principales proyectos del CIEMAT se ha evaluado y considerado la influencia climática exterior sobre el edificio, la caracterización del comportamiento energético, la cuantificación del confort térmico y la calidad del aire interior, el análisis del comportamiento en base a las tendencias registradas, la validación y calibración de los modelos de simulación y la optimización de modelos de control predictivo.

**Palabras clave:** Monitorización de edificios; Caracterización energética de edificios; Caracterización de la envolvente; Modelado empírico; Confort térmico; Calibración de modelos de simulación; Control predictivo; Calidad del aire.

## *Building Energy Experimental Assessment at the UiE3 CIEMAT's R&D Unit: Objectives, methodologies and applications*

### ABSTRACT

*The experimental evaluation of buildings is carried out through the measure of its energy response to external and internal fluctuations. The application of this type of methodologies allows knowing the real behavior of the building, identifying the most relevant flows and enabling the global optimization of the system to achieve a building with low energy consumption. This type of tools allows facing the challenges of cities towards a low carbon energy transition. The Energy Efficiency in Buildings unit of CIEMAT has wide experience in monitoring buildings. Among the main studies of CIEMAT it has been evaluated the climatic influence on the building performance, the characterization of the energy behavior, the quantification of thermal comfort and the quality of indoor air, the behavior analysis based on the registered trends, the validation and calibration of simulation models and the optimization of predictive control models.*

**Keywords:** *Building monitoring; Building energy performance; Envelope energy assessment; Empirical modeling; Thermal comfort; Calibration of simulation models; Model Predictive control; Indoor air quality.*

## 1. Introducción

El sector de la construcción (residencial y de servicios) es uno de los mayores consumidores de energía de la Unión Europea, 38.1% según los datos de Eurostat 2016) (1). Este hecho ha convertido a la edificación en uno de los retos principales para una transición hacia un sistema sostenible de consumo cero de energía y emisiones neutras de CO<sub>2</sub>. Para hacer frente a este objetivo es necesario reducir el consumo de energía del sector, tanto en edificios nuevos como en existentes. Con respecto a los edificios nuevos, todos los países han modificado su normativa para construir edificios de bajo consumo de energía que integren sistemas de energía renovable (2). Por otro lado, la implementación de estrategias de renovación reduce el consumo de energía de los edificios existentes, dando lugar a edificios más sostenibles (3). En ambos casos, el comportamiento del edificio debe estar adaptado a las tendencias climáticas actuales.

La mayor parte de la normativa actual sobre la calidad energética y al ahorro de energía en el acondicionamiento de los edificios se aplica en la fase de diseño y se basa en análisis teóricos realizados mediante software de simulación. Sin embargo, muchos estudios revelan que el comportamiento real tras la construcción del edificio puede desviarse significativamente de este comportamiento teórico (4). La incorporación en la normativa de procedimientos experimentales tiene gran potencial en cuanto a resolver los problemas que introducen las discrepancias entre los resultados de las evaluaciones teóricas y el comportamiento real de los edificios.

La monitorización de edificios permite evaluar diferentes aspectos, existiendo diferentes metodologías experimentales para analizar el comportamiento energético de los edificios y de sus componentes, que abarcan desde largas campañas hasta medidas específicas más cortas. Estos procedimientos permiten evaluar el comportamiento energético del edificio en condiciones reales de uso y minimizar las discrepancias existentes con los modelos teóricos.

## 2. Proyectos

La Unidad de I+D sobre Eficiencia Energética en la Edificación (UiE3) del CIEMAT desarrolla proyectos de I+D incorporando campañas de monitorización energética de edificios desde 1986, habiendo desarrollado y aplicado metodologías de medida y análisis de datos experimentales para llevar a cabo la evaluación experimental de los mismos en condiciones reales de uso.

La UiE3 del CIEMAT ha realizado trabajos de monitorización centrados en los siguientes aspectos: Evaluación de la influencia climática sobre el edificio, la caracterización del comportamiento energético del edificio, la cuantificación del confort térmico y la calidad del aire interior, el análisis del comportamiento en base a las tendencias registradas en estancias, etc. Las técnicas aplicadas a la caracterización energética de edificios han sido principalmente la identificación de sistemas (problema inverso), y también pero en menor medida la validación y calibración de los modelos de simulación (problema directo). Ambas técnicas se han planteado también para la optimización de modelos de control predictivo.

Esta actividad se ha llevado a cabo en el marco de proyectos desarrollados en colaboración con empresas y otros centros de investigación nacionales e internacionales, y han sido financiados por la Unión Europea, el Ministerio de Ciencia e Innovación, diferentes Comunidades Autónomas y Ayuntamientos. Algunos de estos proyectos también se han desarrollado en el marco de diferentes grupos de trabajo de los Programas de la Agencia Internacional de la Energía. A continuación se citan los más recientes de estos proyectos en los que se han desarrollado estos trabajos de monitorización:

- Proyecto PSE-ARFRISOL (PS-120000-2005-1). 2005-2012. Proyecto tecnológico singular y de carácter estratégico sobre arquitectura bioclimática y frío solar (5). Convocatoria: Proyectos singulares estratégicos, Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades.
- Programa OMEGA-CM (S2013/MAE2835). 2014-2018. Medidas de calidad y no intrusivas para la evaluación y optimización energética de edificios existentes con elementos constructivos avanzados

- (6). Convocatoria Tecnologías 2013, de la Comunidad de Madrid.
- Proyecto Energysis (RTC-2016-5306-3). 2016-2019. Desarrollo de un sistema transportable de isla energética para estructuras modulares de baja demanda y alta eficiencia (7). Convocatoria Retos de Colaboración 2016, del Ministerio de Economía, Industria y Competitividad.
  - Proyectos Annex 58 (2011-2016, Reliable Building Energy Performance Characterisation based on Full Scale Dynamic Measurements (8)) y Annex 71 (2016-2021. Building energy performance assessment based on in-situ measurements (9)) ambos del “Programa Energy in Buildings and Communities (EBC)” de la Agencia Internacional de la Energía (IEA).

## 3. Metodología

### 3.1. Evaluación del comportamiento térmico de un edificio a partir de la caracterización climática

El clima afecta directamente al comportamiento energético de los edificios, impactando en mayor o menor medida en las demandas en calefacción y refrigeración. El tiempo de vida de los edificios construidos se estima en al menos 50 años. Ambos hechos denotan la necesidad de determinar la influencia de los efectos del cambio climático sobre el comportamiento energético de los mismos. El año de construcción del edificio es un factor clave en el impacto que el clima tiene en su comportamiento térmico. El efecto es mayor en el caso de los edificios más antiguos, previos a 1979, en los que la normativa española reguladora aplicada en su construcción era menos estricta energéticamente hablando. Por ello será necesario potenciar la rehabilitación energética de dichos edificios con el objetivo de afrontar los escenarios futuros de clima proyectados para los próximos años. En ellos se prevé una disminución significativa en las cargas de calefacción del edificio debido al calentamiento climático que puede contrarrestar o no el aumento en el consumo de energía de refrigeración, dependiendo del edificio y de su localización.

La mayoría de las herramientas de simulación dinámica del comportamiento de los edificios utilizan archivos de clima típicos o históricos que no consideran el impacto de la evolución del clima. Por tanto, disponer de información meteorológica actualizada permite ajustar las políticas y los planes de actuación en edificación desarrollados por las autoridades gubernamentales y otros agentes de la construcción.

#### 3.1.1. Influencia de la climatología

Recientemente se ha analizado el impacto de la evolución del clima en el comportamiento térmico de edificios de tipo residencial en Madrid (10). Para ello se evaluaron tres escenarios climáticos diferentes: dos años meteorológicos tipo basados en datos medidos anteriormente al año 2000, y un fichero climático experimental con valores medios de las variables meteorológicas registrados en la última década en las instalaciones del CIEMAT (11). Se realizan comparaciones anuales y mensuales entre las tres bases de datos climáticas. Los datos experimentales de la última década registraron un incremento de 1.8°C en el valor medio de la temperatura, siendo la humedad relativa un 9% inferior. Se identifica por tanto una clara tendencia en el clima de Madrid en la última década hacia un clima más cálido y seco.

El estudio simula y compara el comportamiento de dos edificios construidos en diferentes décadas, desarrollando un mismo modelo de edificio tipo residencial en Madrid caracterizado por diferentes propiedades según su año de construcción (1997 y 2006).

Respecto al comportamiento energético de los edificios, se confirma el cambio de tendencia en las cargas térmicas de estos, aumentando el peso de las cargas de refrigeración en la demanda global del edificio. Este efecto es más notorio en los edificios construidos en la última década, debido a la aplicación de normativa de construcción más restrictiva.

De los estudios de inercia térmica se concluye que los edificios construidos bajo criterios normativos más estrictos presentan mayores diferencias de temperaturas entre el interior y el exterior. Además, los porcentajes de sensación de confort adaptativo decrecen con el cambio climático registrándose un menor número de horas en confort, excepto en el periodo invernal.

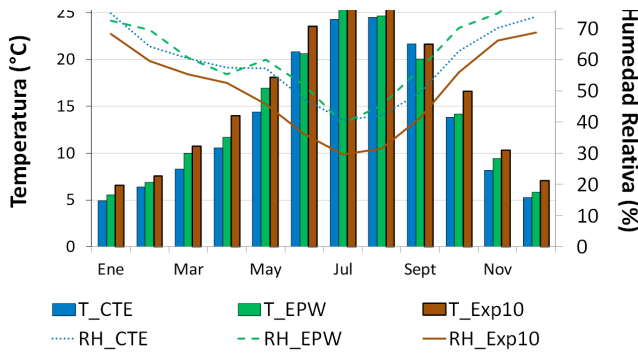


Figura 1. Evolución anual de la temperatura y la humedad relativa para los tres escenarios climáticos en Madrid.

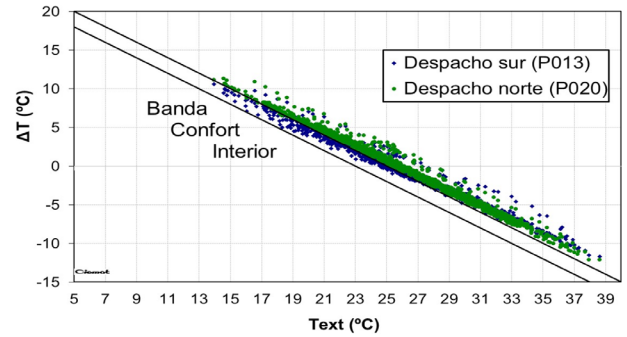


Figura 3. Oscilación térmica registrada en el interior de un despacho sur durante el verano.

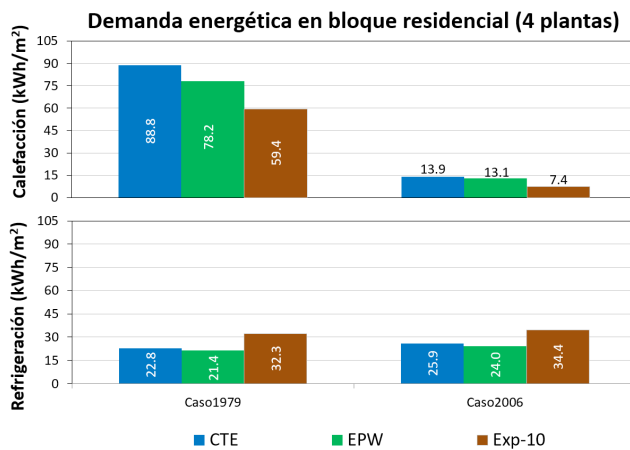


Figura 2. Cargas térmicas de calefacción y refrigeración obtenidas con TRNSYS para los tres escenarios climáticos en Madrid.

### 3.1.2. Análisis de Componentes Principales

Para verificar la representatividad de las estancias monitorizadas, se emplea el Análisis de las Componentes Principales (PCA) (12.13). Esta técnica permite identificar las relaciones lineales del comportamiento de la temperatura del aire interior en las diferentes estancias evaluadas, destacando las estancias más y menos representativas del comportamiento térmico del edificio. Tras la identificación de estas estancias se monitorizan durante la campaña experimental.

### 3.1.3. Balance térmico en los edificios

El balance térmico del edificio monitorizado se analiza mediante las oscilaciones entre el interior y el exterior. Si sobre estas diferencias se establecen unas consignas de temperatura estacionales se puede estimar como de confortables son las estancias a lo largo del año. Para ello se establecen dos bandas de confort, una invernal y otra estival.

La oscilación térmica horaria permite estimar la inercia térmica de cada estancia analizada, siendo necesario conocer los valores de consumo (14). El análisis de los perfiles de temperatura y humedad permite obtener los periodos extremos, identificando en qué momento se producen. La cuantificación de los rangos de temperatura interior se realiza a través de histogramas (15), obteniendo los porcentajes de ocurrencia en cada rango.

Estos estudios se pueden realizar durante todo el periodo de análisis (Figura 3), o a lo largo de días representativos que simbolizan el comportamiento medio de un periodo de tiempo determinado. La selección de estos días típicos se hace mediante la metodología Hall. Este procedimiento empírico emplea los registros meteorológicos y las estadísticas de Filkenstein-Schafer, para identificar el día más representativo como el valor mínimo de la suma ponderada (16).

### 3.1.4. Estimación de las demandas térmicas: Grados-día.

La diferencia de temperatura entre el interior y el exterior del edificio representa la distribución horaria de energía producida durante un periodo de tiempo. Si sobre estos valores se establecen las consignas estacionales se pueden cuantificar las demandas térmicas. Esta metodología emplea los valores horarios de variables ambientales filtrados y las bandas de confort invernal y estival, así como calcula las desviaciones obtenidas entre ambos. Este método permite estimar los grados de calefacción y refrigeración (16).

### 3.1.5. Recomendaciones para edificios: carta de Givoni

El punto de partida en la proposición de medidas para una renovación eficiente de un edificio, es el conocimiento de las condiciones higro-térmicas y los procesos físicos asociados a ellas. Los balances térmicos entre el exterior y el interior proporcionan información sobre posibles medidas de mejora (14). Otro método de evaluación es a través de las cartas bioclimáticas de Givoni (17). Estas cartas se obtienen a partir de un diagrama psicrométrico sobre el que se superponen diferentes estrategias de acondicionamiento pasivo y activo (ganancias internas, energía solar activa o pasiva, elementos de sombra, enfriamiento evaporativo...), así como la zona de confort térmico. Este análisis se hace empleando pares de temperatura y humedad máximos, mínimos y medios, y valores límite de radiación solar y velocidad de viento. Estos valores identifican diferentes medidas de adaptación relacionadas con la reducción de las necesidades de calefacción y aire acondicionado (Figura 4).

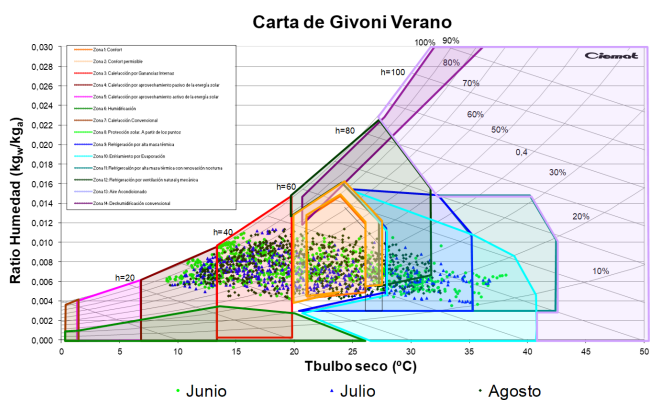


Figura 4. Diagrama de Givoni para condiciones de verano.

### 3.2. Obtención de índices de confort térmico

Uno de los objetivos perseguidos con la monitorización es cuantificar cómo de confortables están los usuarios en el ambiente térmico interior. Se han empleado dos metodologías para analizar el nivel de confort térmico interior: cuantitativas y adaptativas.

#### 3.2.1. Confort cuantitativo: PMV y PPD

El enfoque cuantitativo se basa en un modelo de equilibrio térmico que se deriva de experimentos rigurosos en cámaras climáticas. Este modelo predice la

sensación térmica promedio que siente una persona en una situación específica. Esta aproximación reduce la interacción de los usuarios con el edificio, siendo adecuada para edificios mecánicamente ventilados. En este contexto, el método Fanger es el más empleado para obtener el confort térmico interior (15.16). Este método calcula los niveles de sensación térmica (PMV) y el porcentaje de personas insatisfechas (PPD) a partir de los valores ambientales interiores, el nivel y tipo de actividad y el grado de vestimenta (Figura 5).

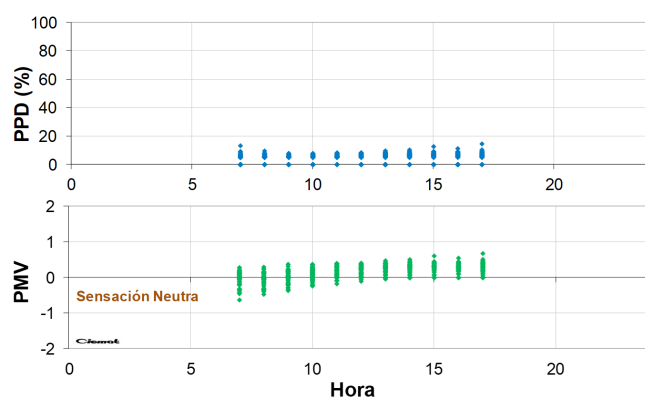


Figura 5. Índices PMV y PPD obtenidos para un despacho sur durante el verano.

### 3.2.2. Confort adaptativo

El enfoque adaptativo se basa en las reacciones de las personas para restaurar el confort en situaciones de insatisfacción térmica. Estos métodos calculan el confort como una función combinada de los niveles de sensación térmica y las mediciones ambientales. El resultado obtenido es una temperatura de operación que correlaciona la temperatura interior en función de la exterior (10). Este enfoque es adecuado para edificios ventilados naturalmente, donde los usuarios tengan interacción con el edificio. En este contexto, los métodos empleados han sido los que establecen las normas UNE-EN 15251 y ASHRAE 55:2004.

### 3.3. Análisis basado en el estudio de tendencias

El proyecto de investigación del CIEMAT Energysis (7), ha realizado un modelado sencillo de edificios a partir de datos experimentales. Este proyecto consiste en una microred híbrida que alimenta a dos módulos



habitacionales: ligero e hiperligero. Se ha construido un modelo simplificado con los datos adquiridos por el sistema de monitorización del CIEMAT. Este modelo se planteó mediante regresión lineal múltiple a través de los estados cuasi-estacionarios del flujo de calor debido a la temperatura exterior, la variación de la temperatura interior con respecto al tiempo y añadiendo correcciones debidas a los efectos de la radiación solar y la acción del viento. También se realizó un análisis mediante varios indicadores estadísticos para valorar la adecuación de los modelos. De este estudio se desprende que hay una fuerte influencia del fenómeno de radiación nocturna, siendo más importante en el módulo hiperligero (envolvente de lona). Este modelo ha permitido entender la causa de ciertos daños observados en el sistema de climatización, así como implementar actuaciones para evitar esos problemas.

### **3.4. Caracterización mediante modelado empírico: Técnicas de identificación de sistemas**

El modelado empírico mediante aplicación de técnicas de identificación de sistemas tiene gran potencial de aplicación en el desarrollo de procedimientos de evaluación del desempeño y también en aplicaciones de control, cuando no se dispone de las características térmicas y geométricas de los edificios o estas son incompletas. Esta técnica requiere medidas de variables energéticas y climáticas que intervienen en la transferencia energética en los edificios.

Existen diversas técnicas con diferente complejidad para realizar el análisis proporcionando resultados con diferente nivel de exactitud (18-19), que también presentan diferencias en cuanto al coste de las campañas experimentales que conducen a obtener los datos necesarios para realizar el análisis (6). En este contexto el procedimiento "Coheating" está muy extendido en Reino Unido y otros países del centro y norte de Europa para la obtención experimental del Coeficiente Global de Perdidas de edificios construidos (20). Este procedimiento se aplica en invierno, con una consigna para la temperatura de aire interior de 25°C. Los parámetros característicos se obtienen mediante la regresión lineal planteada como ecuación de balance energético análoga a la del estado estacionario, tomando promedios diarios de las variables. El

uso de promedios es indispensable para este método. Estos ensayos deben realizarse con el edificio vacío, lo cual limita su uso en aplicaciones de rehabilitación por las posibles molestias que ello pueda causar a los usuarios. Además estas condiciones de ensayo limitan mucho la aplicabilidad en zonas con clima cálido y soleado como España y otros países del sur de Europa. Estos problemas ponen de manifiesto la necesidad de desarrollar procedimientos aplicables bajo un rango más amplio de condiciones dinámicas de edificios en uso y con mayor variabilidad climática.

Las técnicas de identificación de sistemas (19), aplicadas ampliamente para la caracterización de componentes constructivos en recintos de ensayo bajo condiciones meteorológicas reales (21), tienen gran potencial de aplicación en edificios, resolviendo los problemas que plantea la aplicación de los procedimientos tradicionales. La UIE3 del CIEMAT ha realizado múltiples trabajos en esta línea de investigación haciendo énfasis en la resolución de problemas derivados de la aplicación de estas técnicas en clima cálido y soleado. Los trabajos realizados se basan en el planteamiento de ecuaciones de balance energético bien en modo integral o bien en modo diferencial.

Uno de los trabajos realizados recientemente por la UIE3 del CIEMAT aplicando un Planteamiento Integral, ha abordado la adaptación de la metodología de análisis basada en regresión lineal múltiple a partir de valores promedio de las medidas. Se han considerado los aspectos dinámicos de la campaña experimental en el planteamiento inicial de las ecuaciones de balance energético de los edificios. Tras integrar estas ecuaciones, y utilizar valores medios como representación de la integral, se obtienen ecuaciones desde el punto de vista formal análogas a las estáticas, pero incluyendo los aspectos dinámicos. Los aspectos críticos e innovadores del procedimiento propuesto son la identificación de:

- El mínimo periodo de integración (o promedio) óptimo, que en el caso de los métodos estáticos se suele considerar fijo, típicamente un día (lo cual puede dar lugar a resultados con altas incertidumbres).
- Los principales efectos que contribuyen al balance energético de los recintos considerados, frente a los efectos despreciables.

La identificación de estos aspectos proporciona criterios para minimizar el periodo mínimo de campaña experimental y también de las variables y equipos necesarios, y por tanto para la reducción de costes de la evaluación experimental. Esto es fundamental a la hora de plantear este tipo de evaluaciones a nivel comercial donde es relevante utilizar metodologías eficientes. En este contexto la eficiencia se refiere a exactitud, coste y no intrusividad.

En el marco del proyecto PSE-ARFRISOL, esta metodología se ha aplicado a la caracterización energética de la envolvente de una oficina en uso (22). Fue posible modelar el aporte energético del sistema de acondicionamiento evitando la medida del caudal en tuberías y conductos, lo cual es relevante ya que se trata de medidas muy intrusivas. Teniendo en cuenta que los recintos estudiados son oficinas, se utilizó el consumo eléctrico de los ordenadores como indicador de la ocupación y para modelar la contribución al balance energético debida a la actividad metabólica. Se concluyó que el periodo de integración mínimo y las variables necesarias dependen de las condiciones de ensayo (climáticas, uso, etc.,.....) y de las propias características del edificio, confirmando que no es posible exportar los procedimientos desarrollados para otros países.

Posteriormente se ha realizado un análisis sistemático de este método dinámico integrado (23). Para ello se ha utilizado un edificio de referencia construido a escala en el marco del Annex 58 del programa EBC de la IEA que también fue utilizado para otros trabajos de investigación desarrollados en este contexto de colaboración internacional. Se han analizado diferentes aspectos del método, a partir de una campaña experimental de más de ocho meses bajo un amplio rango de condiciones meteorológicas y de ensayo en el LECE de la UiE3 del CIEMAT en la Plataforma Solar de Almería (24). Se ha obtenido experimentalmente el Coeficiente Global de Pérdidas y el Coeficiente de Ganancia Solar. Para ello se han considerado diferentes modelos candidatos basados en diferentes aproximaciones. Como criterios de validez de los modelos estudiados se han considerado el acuerdo entre los resultados obtenidos para diferentes series de datos y el coeficiente de regresión de cada uno de los modelos. Adicionalmente

en este caso la validación ha contado con los valores de diseño por tratarse de un edificio de referencia. También se han considerado el coste y la intrusividad de los dispositivos utilizados para producir los datos utilizados en cada modelo entre los criterios para la selección del modelo. El Coeficiente Global de Pérdidas muestra diferentes valores para periodos de integración bajos y su tendencia se estabiliza a partir de cierto periodo de integración (Figura 6a). Para periodos de integración de un día se observan incertidumbres muy altas, que se reducen al aumentar dicho periodo de integración (Figura 6b). El coeficiente de regresión aumenta a medida que aumenta el periodo de integración (Figura 6c). Los resultados obtenidos corroboran los resultados de trabajos previos (22, 25). Este trabajo sistemático ha permitido seleccionar un modelo para generar el resultado final siendo este el que resulta más barato y menos intrusivo en cuanto a los diferentes equipos de medida utilizados para obtener este resultado.

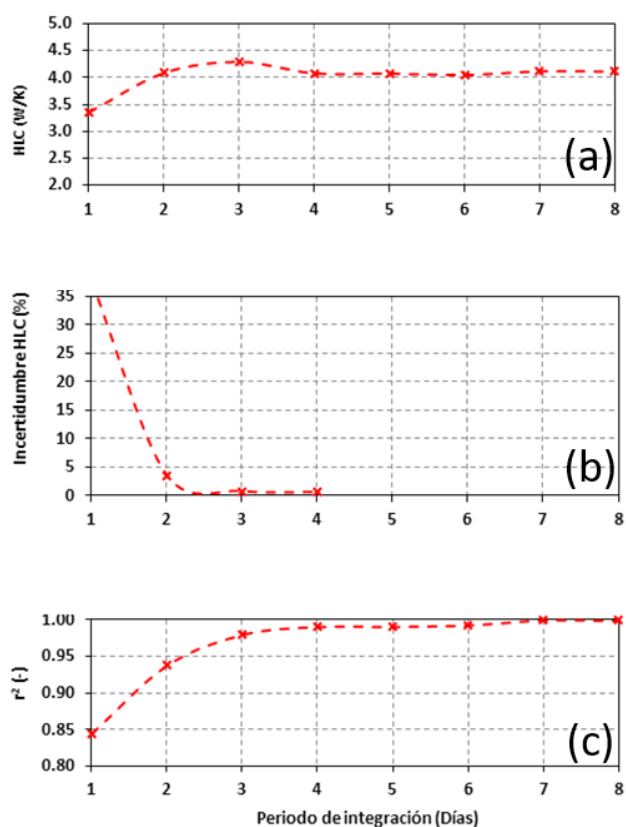


Figura 6. Resultados obtenidos para diferentes periodos de integración. (a) Coeficiente Global de Pérdidas (HLC). (b) Incertidumbre estimada para el HLC. (c) Coeficiente de regresión.

También se han aplicado modelos dinámicos con un Planteamiento Diferencial. Se ha llevado a cabo un amplio desarrollo de metodologías y herramientas para la caracterización de los componentes constructivos bajo condiciones meteorológicas reales en un contexto de colaboración internacional (25, 27), donde la UiE3 del CIEMAT ha participado activamente (18, 19, 28).

En este contexto, la UiE3 del CIEMAT ha publicado recientemente un trabajo aplicando modelos dinámicos tipo RC a la caracterización de la envolvente de un edificio residencial en condiciones reales de uso (29). Se obtuvo experimentalmente el Coeficiente Global de Pérdidas de un edificio que incorpora un buen aislamiento térmico. Este edificio estaba situado en Gainsborough, Reino Unido. El caso de estudio, y los datos utilizados para el trabajo, fueron facilitados a los participantes del Annex 71 (*Building energy performance assessment based on in-situ measurements*) del Programa EBC de la IEA. El análisis realizado se ha centrado principalmente en la identificación de las principales contribuciones al balance energético en el volumen confinado por la envolvente del edificio y a la trasposición de estas contribuciones a los modelos RC utilizados para obtener los parámetros de interés.

Tras el análisis cualitativo y preprocesado, se construyeron varios modelos candidatos considerando diferentes hipótesis y aproximaciones plausibles. La validez de los resultados obtenidos utilizando los modelos candidatos propuestos se evaluó en base al acuerdo entre los resultados obtenidos a partir de diferentes series de datos y también a partir del nivel de los residuos obtenidos utilizando los diferentes modelos. Finalmente se obtuvo el Coeficiente Global de Pérdidas a partir del balance energético incluyendo las siguientes contribuciones relevantes: calefacción, ganancia solar, ganancias internas debidas a electrodomesticos y a la actividad metabólica.

Estos términos se modelaron mediante las siguientes variables motrices: consumo de gas y agua, electricidad producida por sistema fotovoltaico, y consumo eléctrico (para modelar las cargas internas debidas a los electrodomesticos y a los patrones de ocupacion).

La Figura 7 muestra el modelo RC seleccionado en base a la validez de los resultados. Los resultados obtenidos con este modelo para diferentes series de datos

(Figura 8), muestran buen acuerdo entre las diferentes series, que ha sido uno de los criterios considerados para evaluar la validez de los resultados.

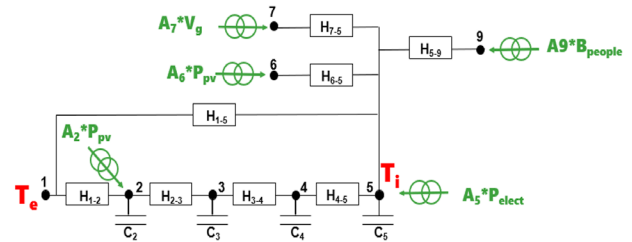


Figura 7. Modelo RC seleccionado para obtener los parámetros característicos de la envolvente del edificio

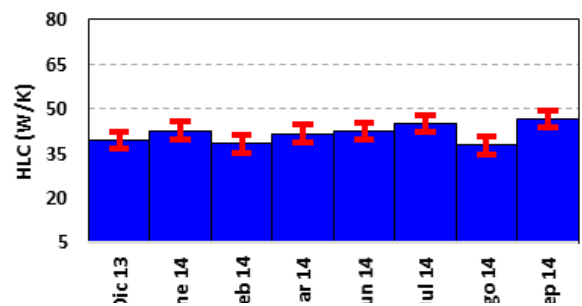


Figura 8. Coeficiente global de pérdidas del edificio considerado a partir del modelo representado en la Figura 7.

### 3.5. Técnicas de validación y calibración de modelos de simulación

Otra de las aplicaciones de la monitorización es cuantificar cómo de representativos del comportamiento del edificio son los modelos de simulación del mismo. Una primera aproximación se realiza mediante la comparación de las salidas de los modelos teóricos y los resultados experimentales. Esta comparativa permite cuantificar las desviaciones producidas entre ambas series de datos. Este procedimiento se ha llevado a cabo en una primera fase del proyecto OMEGA-CM, en un edificio monozona ubicado en la Plataforma Solar de Almería (30). La aplicación de esta metodología ha permitido estimar la representatividad del modelo de simulación dinámica del edificio, dando como resultado una

correlación lineal ( $R^2$  de 0.96 para verano y 0.85 para invierno). Los valores de desviación de los residuos de la temperatura del aire interior no superaron  $0.3^\circ\text{C}$  para verano y de  $0.5^\circ\text{C}$  para invierno (Figura 9). El nivel de precisión del modelo se cuantificó mediante el coeficiente de variación del error cuadrático medio y el error del sesgo medio normalizado, dando porcentajes inferiores al 10% a lo largo de todo el año.

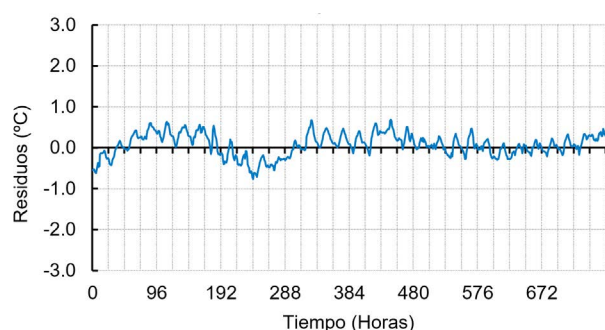


Figura 9. Comparativa de la temperatura interior del aire simulada y experimental durante el verano de 2004.

Una vez verificado la representatividad del modelo teórico con los datos reales, se llevó a cabo un análisis de sensibilidad que permitiera cuantificar las incertidumbres producidas en el comportamiento del edificio durante el proceso de construcción del mismo. Los resultados obtenidos mostraron un aumento del consumo y de las cargas térmicas máximas del edificio cuando se producía una desviación de las especificaciones de diseño. Se consideraron desviaciones del orden de magnitud de las variaciones que puede introducir el proceso de puesta en obra respecto a estas especificaciones.

Los modelos de simulación requieren el conocimiento de las propiedades térmicas de los materiales y de la geometría del edificio, y se han utilizado tradicionalmente en aplicaciones de diseño, pero su calibración y validación mediante medidas experimentales extiende su utilidad para evaluación del desempeño y control. En uno de los trabajos desarrollados en el programa OMEGA CM se ha identificado el conjunto mínimo de medidas necesario para calibrar modelos de Simulación Energética de Edificios mediante análisis de sensibilidad (31). Las variables climáticas, la tem-

peratura de interior de aire y superficies configuran un conjunto completo de medidas no intrusivas para la calibración del modelo en evolución libre. La validación de los modelos de simulación energética de edificios requiere añadir medidas no intrusivas de concentración de  $\text{CO}_2$  y estado de puertas y ventanas que permiten mejorar el modelo en cuanto a las tasas de ventilación e infiltración.

La validez de la metodología propuesta se ha verificado con su aplicación a dos edificios reales en diferentes localizaciones para un año completo incluyendo periodos con demandas de calefacción y de refrigeración. La validez del modelo se ha verificado identificando las propiedades térmicas de la envolvente y la tasa de renovaciones por ventilación mecánica. Como ejemplo, se han evaluado las hipótesis consideradas en un caso práctico, observándose que la estimación de la carga térmica puede desviarse hasta tres veces dependiendo de las aproximaciones consideradas, lo cual pone de manifiesto la utilidad de la calibración de estos modelos a partir de campañas de monitorización. Para los casos evaluados, se ha identificado el intercambio de energía con el terreno, y al índice de renovaciones de aire por infiltración, como los efectos cuyas hipótesis son más relevantes sobre la estimación de cargas de acondicionamiento.

### 3.6. Calidad de aire

En el marco del Proyecto PSE-ARFRISOL se analizó la calidad de aire en el interior de las estancias monitorizadas de los edificios bioclimáticos del proyecto, con el objetivo de vigilar la salubridad del ocupante, empleando para ello diferentes equipos de medida (32-33). Se ha determinado qué contaminantes son los existentes en el interior de los edificios tanto los COVs (Componentes Orgánicos Volátiles), así como otros elementos inorgánicos en forma de partículas que son igualmente nocivos para el ocupante. Un logro importante ha sido poder cuantificar (además de haber calificado) in situ estos contaminantes; concluyendo que el número de COVs encontrados en edificios bioclimáticos es muy inferior a los encontrados en edificios convencionales. También es relevante haber analizado el edificio en fase de construcción y haber realizado un seguimiento temporal desde la inauguración. Se ha observado que el edificio bioclimático en su primer año tras la obra, se ha

limpiado mucho mejor que las construcciones convencionales (Figura 10), debido a las renovaciones de aire particulares de este tipo de construcción.

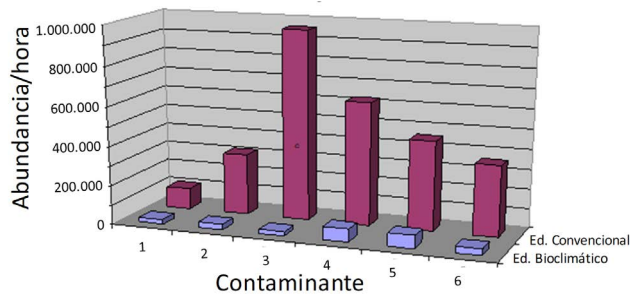


Figura 10. Comparativa de los contaminantes alcanzados en un edificio bioclimático y otro convencional.

## 4. Bibliografía

- (1) Eurostat, Energy Efficiency in Buildings, <https://epthinktank.eu/2016/07/08/energy-efficiency-in-buildings/energy-consumption-by-sector/>
- (2) Gobierno de España, Ministerio de Vivienda. Código Técnico de la Edificación Española. R. D. 314/2006, BOE nº74 del 28/03/2006. REF. BOE-A-2006-5515.
- (3) S. Soutullo, E. Giancola, M.R. Heras, 2018. Dynamic energy assessment to analyze different refurbishment strategies of existing dwellings placed in Madrid. *Energy* 152,1011-1023.
- (4) W. Tian, Y. Heo, P. de Wilde, Z. Li, D. Yan, C.S. Park, X. Feng, Augenbroe G. 2018. A review of uncertainty analysis in building energy assessment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 93:285–301.
- (5) Proyecto PSE-ARFRISOL. [www.arfrisol.es](http://www.arfrisol.es) . Visto el 22/05/2020.
- (6) Programa OMEGA-CM. <http://projects.cimat.es/web/omega-cm> . Visto el 22/05/2020.
- (7) Proyecto Energysis. 2016-2019. <http://projects.cimat.es/web/energysis>. Visto el 22/05/2020.
- (8) Proyecto IEA EBC Annex 58. 2011-2016. <http://www.iea-ebc.org/projects/project?AnnexID=58>. Visto el 22/05/2020.
- (9) Proyecto IEA EBC Annex 71. 2016-2021. <http://www.iea-ebc.org/projects/project?AnnexID=71>. Visto el 22/05/2020.
- (10) S. Soutullo, E. Giancola, M.J. Jiménez, J.A. Ferrer, M.N. Sánchez. 2020. How Climate Trends Impact on the Thermal Performance of a Typical Residential Building in Madrid. *Energies*. 13(1), 237.
- (11) M.N. Sánchez, S. Soutullo, R. Olmedo, D. Bravo, S. Castaño; M.J. Jiménez. 2020. An experimental methodology to assess the climate impact on the energy performance of buildings: A ten-year evaluation in temperate and cold desert areas. *Applied Energy*. 264, 114730.
- (12) R. Enríquez, M.J. Jiménez, M.R Heras (2012). Analysis of a solar office building at the south of Spain through simulation model calibration. *Energy Procedia*, 30, 580-589.
- (13) Soutullo, S., Sánchez, M.N., Enríquez, R., Olmedo, R., Jiménez, M.J., Heras, M.R. (2016). Comparative thermal study between conventional and bioclimatic office buildings. *Building and Environment*, 125, 95-103.
- (14) E. Giancola, S. Soutullo, R. Olmedo, Heras, M.R. (2014a). Evaluating rehabilitation of the social housing envelope: Experimental assessment of thermal indoor improvements during actual operating conditions in dry-hot climate, a case study. *Energy and Buildings*, 75, 264-271.
- (15) S. Soutullo, M.N. Sánchez, R. Enríquez, R. Olmedo, M.J. Jiménez (2017). Bioclimatic vs conventional building: experimental quantification of their thermal improvements. *Energy Procedia*, 122, 823-828.
- (16) S. Soutullo, R. Enríquez, M.N. Jiménez, M.R. Heras (2014b). Thermal comfort evaluation in a mechanically ventilated office building located in a continental climate. *Energy and Buildings*, 81, 424-429.
- (17) S. Soutullo, M.N. Sánchez, R. Enríquez, M.J. Jiménez, M.R. Heras 2015 Septiembre. Thermal comfort assessment in a sustainable designed office building. 36th AIVC International Conference. Madrid.
- (18) M.J. Jiménez, H. Madsen. 2008. Models for

- Describing the Thermal Characteristics of Building Components. Número especial sobre ensayos de cerramientos en condiciones reales. *Building and Environment*. 43(2), pp. 152-162.
- (19) M.J. Jimenez, et al. 2016. "Report of Subtask 3 – Part 1. Thermal performance characterization based on full scale testing - description of the common exercises and physical guidelines". (Editor: M.J. Jiménez). IEA EBC Annex 58 Final Reports. ISBN: 9789460189876, Published by KU Leuven, Belgium.
- (20) R. Jack, D. Loveday, D. Allinson, K. Lomas. 2017. First evidence for the reliability of building coheating tests. *Building Research & Information*. 46(4). 383-401.
- (21) UiE3-CIEMAT. 2020. Recintos de Ensayo del Laboratorio de ensayos Energéticos para Componentes de la Edificación (LECE) del CIEMAT. Tipos de recintos, metodologías y casos de estudio. Capítulo en este libro.
- (22) L. Castillo, R. Enríquez, M.J. Jiménez, M.R. Heras. 2014. "Dynamic integrated method based on regression and averages, applied to estimate the thermal parameters of a room in an occupied office building in Madrid". *Energy and Buildings*. 81, pp. 337-362.
- (23) K. Chávez, D.P. Ruiz, M.J. Jiménez. 2019. Dynamic integrated method applied to assessing the in-situ thermal performance of walls and whole buildings. Robustness analysis supported by a benchmark set-up. *Applied Thermal Engineering*. 152C, pp. 287-307.
- (24) S. Castaño, J.D. Guzmán, M.J. Jiménez, M.R. Heras. 2016. "LECE-UiE3-CIEMAT". Chapter of "Report of Subtask 1a: Inventory of full scale test facilities for evaluation of building energy performances". (Editor: A. Janssens). IEA EBC Annex 58 Final Reports. ISBN: 9789460189906, Published by KU Leuven, Belgium.
- (25) I. Naveros, M.J. Jiménez, M.R. Heras. 2012. Analysis of capabilities and limitations of the regression method based in averages, applied to the estimation of the U value of building component tested in Mediterranean weather. *Energy and Buildings*. 55, pp. 854-872.
- (26) P.A. Strachan, P.H. Baker. 2008. Special issue on outdoor testing, analysis and modelling of building components. EDITORIAL. *Building and Environment*, 43, pp. 127-128.
- (27) DYNASTEE Network. [www.dynastee.org](http://www.dynastee.org). Visto el 18/05/2020.
- (28) M.J. Jiménez, H. Madsen, K. K. Andersen 2008. Identification of the Main Thermal Characteristics of Building Components using MATLAB. *Building and Environment*. 43(2), pp. 170-180.
- (29) H.P. Díaz-Hernández, P.R. Torres-Hernández, K.M. Aguilar-Castro, E.V. Macias-Melo, M.J. Jiménez. 2020. Data - Based RC Dynamic Modelling Incorporating Physical Criteria to Obtain the HLC of In-Use Buildings: Application to a Case Study. *Energies*. 13(2), 313.
- (30) B. Porcar; S. Soutullo; R. Enríquez, M.J. Jiménez. 2018. Quantification of the uncertainties produced in the construction process of a building through simulation tools: A case study. *Journal of Building Engineering*. 20, pp. 377-386.
- (31) R. Enríquez, M.J. Jiménez, M.R. Heras. 2017. Towards non-intrusive thermal load Monitoring of buildings: BES calibration. *Applied Energy*. 191, pp. 44–54.
- (32) UiE3-CIEMAT. 2020. Monitorización de Sistemas Constructivos, Edificios y Entornos Urbanos en la Unidad de I+D UiE3 del CIEMAT. Medida directa, indirecta e índices. Capítulo en este libro.
- (33) O. Seco, A. Garrido, J.A. Ferrer, M.R. Heras. Análisis de calidad de aire en interiores de edificios C-DdI ARFRISOL. Comparativa edificación bioclimática frente a convencional. I Congreso Arquitectura Bioclimática y Frio Solar (PSE-ARFRISOL). Almería 24-03-2010.

# Metodología para la caracterización térmica de construcciones tradicionales en clima mediterráneo

Ee/3D-VCR. UNIVERSIDAD DE CASTILLA LA MANCHA (UCLM)

Víctor Pérez (1), Carolina Aparicio (2), Francisco Castilla (1), Melchor Monleón (2), José Luis Vivancos (2)

(1) Universidad de Castilla La Mancha (España).

(2) Universitat Politècnica de València (España).

Persona de contacto/Corresponding author: [victor.perez@uclm.es](mailto:victor.perez@uclm.es) (Pérez-Andreu/Víctor)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7588-5833> (V. Pérez); <https://orcid.org/0000-0003-1961-6174> (F.Castilla); <https://orcid.org/0000-0002-8524-5466> (J.L. Vivancos)

## Metodología para la caracterización térmica de construcciones tradicionales en clima mediterráneo

### RESUMEN

La evaluación de la eficiencia energética mediante simulación de modelos forma parte de los proyectos de edificios nuevos o de rehabilitación. Las normativas que establecen las metodologías de cálculo a emplear y los estándares mínimos a alcanzar evolucionan hacia unas mayores exigencias. Los modelos de simulación son muy complejos y se determinan con un elevado número de variables. Para obtener resultados se utilizan software especializados para la realización de los numerosos y pesados cálculos. Como en todo proceso de simulación, existen discrepancias entre los resultados de la simulación y el comportamiento energético real de los edificios en uso. Esta cuestión es uno de los retos de los especialistas en este sector, lo que hace necesario obtener datos experimentales mediante la monitorización física de casos reales, para la calibración y validación los modelos térmicos de los edificios. En el campo profesional la posibilidad de realizar monitorizaciones está sujeta a las circunstancias específicas de cada proyecto. Como alternativa, es posible el uso de valores obtenidos mediante estudios sistematizados de tipos arquitectónicos afines. En este artículo se plantea la metodología para la caracterización térmica de una serie de tipos arquitectónicos para el intercambio de experiencias entre los participantes del Proyecto de Excelencia Red Monitor. La metodología de caracterización térmica utilizada se basa en la monitorización de parámetros de temperatura y humedad de los edificios en uso, durante períodos representativos, y en validación de los modelos mediante el ajuste de parámetros de ventilación e infiltración.

**Palabras clave:** Eficiencia energética de edificios; Monitorización; Calibración.

## *Thermal characterization of traditional buildings with a Mediterranean climate*

### ABSTRACT

*Energy efficiency evaluation through/by means of model simulation is part of new building or rehabilitation projects. Regulation establishing the methodologies for the calculation to be used and minimum standards evolve to meet the highest demands. This complex simulation models are determined in many different variables. To obtain results, specialized software is used to perform numerous and complex calculations. There are discrepancies between simulation results and actual energy performance of buildings in use. This issue is one of the greatest challenges for specialists in this area. Experimental data through physical monitoring of real cases need to be obtained, for calibration and validation of the thermal models of buildings. In the professional sector, possibility of monitoring is subject to the specific circumstances of each project. Alternatively, it is possible to use values obtained by systematic studies of related architectural types. This article reports on the methodology used for the thermal characterization of a series of architectural types to exchange experiences among participants of the Proyecto de Excelencia Red Monitor. The thermal characterization methodology used is based on monitoring the temperature and humidity parameters of the buildings in use, during representative periods, and on validation of the models by adjusting the ventilation and infiltration parameters.*

**Key words:** *Building energy efficiency; Monitoring; Calibration*



## 1. Introducción

La Directiva UE 2018/844, Energy Performance of Buildings Directive (EPBD), señala que el sector de la construcción europeo consume el 40 % de la energía y en torno al 75 % de los edificios de la unión son ineficientes desde el punto de vista energético. A nivel regional, existen previsiones sobre el consumo final energético del sector residencial español para climatización y agua caliente, que indican un aumento del 33% de consumo en los hogares para el año 2030 con respecto a los valores de 2015 (1). Estos pronósticos corresponden con un escenario de mantenimiento de las actuales políticas energéticas, descarbonización y desarrollo tecnológico. En términos de la energía primaria, el aumento del consumo energético de esos servicios domésticos sería del 262% para los sistemas de refrigeración por aire, y del 40% y el 18% para el agua caliente y la calefacción, respectivamente. La EPBD dirige las políticas públicas europeas a la obtención de un parque inmobiliario de alta eficiencia energética y descarbonizado antes de 2050 y, en consecuencia, los estándares normativos actuales en materia de eficiencia energética de edificios aumentan en su grado de exigencia, tal y como se puede observar en el nuevo código DB-HE 2019.

La cantidad de energía térmica que demandan los servicios instalados en los edificios se determina en el diseño, las características constructivas, el entorno climático y los parámetros de confortabilidad de los usuarios. Para reducirla, es fundamental controlarla con precisión en todas las fases del ciclo de vida de los edificios. Con este fin se establecen metodologías de cálculo para obtener resultados que normalmente son de resolución horaria, durante un periodo anual, en el que intervienen un elevado número de variables que componen complejos modelos numéricos (2). La creación de estos modelos exige laboriosos procesos de toma y análisis de datos, siendo necesaria la utilización de potentes programas de simulación que facilitan la obtención de los valores energéticos de los edificios a caracterizar.

Las desviaciones entre los resultados de simulación y el comportamiento energético real de los edificios es un desafío para los especialistas del sector.

La incertidumbre de estos resultados es causada por la suma de diferentes factores, relacionados con la calidad de los datos de entrada, errores humanos de operación, y la precisión en las herramientas de cálculo y de monitorización. Este asunto general se ha estudiado ampliamente durante las últimas de dos décadas, centrándose estos estudios en la comprensión, cuantificación y la búsqueda de las causas (3). Focalizando en estudios del sector residencial, las causas que reciben una especial atención son: el microclima específico a cada edificio, los modos de operación, las tasas de ventilación y las infiltraciones. En conjunto, el problema se considera más relacionado con la calidad de los datos de modelización que con el error de cálculo de las herramientas normalmente utilizadas. En general, está comprobado que las herramientas proporcionan cálculos con una precisión aceptable cuando son utilizadas de forma adecuada, sin embargo, los datos de entrada que se utilizan muestran diferentes grados de incertidumbre.

Generalmente, en los estudios científicos del comportamiento térmico de los edificios se utilizan métodos de calibración para reducir la incertidumbre de los resultados y validar los modelos de forma previa a la realización de los ensayos de simulación (4). Para ello es necesario proceder a la realización de mediciones que, dado el carácter transitorio del problema, deben obtenerse mediante la monitorización física de casos reales, durante periodos suficientemente significativos. En un contexto profesional estos métodos no siempre son posibles, debido a las condiciones inherentes a los proyectos para edificios nuevos, y a las condiciones económicas y plazos temporales de muchos proyectos de rehabilitación.

En ausencia de datos experimentales es necesario utilizar valores de referencia que sean lo suficientemente coherentes para reducir así la incertidumbre de los supuestos, y en consecuencia aumentar la fiabilidad de los modelos y la precisión de los resultados de la simulación. Para ello, los parámetros de entrada deben justificarse en estudios de base científica, y sistematizados en función de la variabilidad arquitectónica y climática de los edificios a analizar. Establecer procedimientos de caracterización y valores de referencia para la práctica profesional es fundamental para trans-

ferir la eficiencia energética al entorno edificado.

Los métodos que presentamos aquí son empleados para la caracterización térmica de una serie de tipos arquitectónicos y constructivos tradicionales, para posteriormente ensayar posibles escenarios futuros de su rehabilitación. Estas tipologías representan aproximadamente un 15% del parque edificado en el municipio de Valencia (5). Los resultados también pueden ser referencia para el análisis de otras edificaciones afines, en clima litoral mediterráneo.

La finalidad de este artículo es informar sobre los procedimientos utilizados por los autores para el análisis térmico de la serie de edificios señalada.

## 2. Metodología

Se presenta a continuación una serie de procedimientos que nos permiten la caracterización térmica de edificios, según los objetivos de nuestros estudios. Las investigaciones se basan en la utilización de métodos de monitorización, simulación, calibración y validación de modelos térmicos que finalmente serán objeto de diferentes ensayos. Los parámetros que se monitorizan siempre son la temperatura y humedad interior y exterior de los edificios. Además, según qué casos, se realizan monitorizaciones y mediciones puntuales de otros parámetros. Normalmente, las temperaturas medias interiores obtenidas en las mediciones son los valores de referencia para el ajuste de los modelos de simulación. En los procedimientos de calibración de los modelos térmicos de los edificios, las variables que habitualmente se utilizan son las tasas de ventilación y de infiltración de los modelos, en modos operacionales. Los modelos ya calibrados se validan con períodos largos de datos estacionales, utilizando criterios estadísticos. Los modelos validados constituyen la base de los diferentes ensayos de demanda energética que se han programado para el desarrollo de la investigación. El objetivo final es estimar el alcance de la ventilación natural y mecánica de la serie de tipos arquitectónicos, sometidos a diferentes situaciones. Partiendo de la caracterización original del edificio, y después la aplicación de los estándares normativos de rehabilitación vigentes, como base de referencia común a todos los modelos, se con-

sideran diferentes escenarios combinados que incluyen: mejoras de envolvente, diferentes parámetros de ventilación natural y mecánica, y posibles escenarios de cambio climático en el ciclo de vida previsto para los casos de los estudios.

### 2.1. Flujo de trabajo

Como fase inicial de los estudios, se recopila y analiza la documentación existente disponible que permite identificar y conocer el edificio. Posteriormente se realizan las inspecciones necesarias para verificar, modificar y completar la información de partida, y crear un completo dossier informativo que es necesario para definir los modelos térmicos del edificio. Normalmente los modelos se inician con información procedente de Sistemas de Información Geográfica, facilitada en formato vectorial con la geometría 2D y una serie de paquetes de datos alfanuméricos complementarios. Es necesario comprobar la correspondencia de esta información con la realidad del edificio y completarse in situ, para poder disponer de datos con suficiente detalle y veracidad.

La inspección de cada edificio se realiza para verificar cualquier sistema pasivo o activo que pueda influir en su comportamiento energético. Por lo tanto, se comprueban: geometrías, dimensiones, orientaciones, entorno urbano, los diferentes espacios existentes en el edificio, los elementos de sombra propios y externos y cualquier elemento que influya en la ventilación y las infiltraciones. Igualmente, se inspeccionan las características térmicas de los elementos de la envolvente mediante la comprobación de los materiales y sistemas constructivos, los marcos y vidrios que componen las carpinterías, y la naturaleza de las particiones interiores. También los sistemas de climatización que pudieran existir, y que en los edificios de nuestros estudios responden a unidades terminales autónomas de frío o calor, exclusivamente. Se recopila su información técnica mediante identificación de cada unidad y se recoge información relativa a los modos de utilización a través de encuesta a los usuarios.

Para la fase de simulación es importante optimizar los tiempos de los procesos de trabajo necesarios. El rendimiento en estos depende de la compatibilidad de los formatos de datos de salida y entrada entre las herramientas de modelado, cálculo, y análisis de resulta-

dos. Los programas de simulación que utilizamos admiten modelos geométricos y constructivos externos, codificados en determinados formatos, y nos sitúan en entornos Building Information Modelling (BIM).

La automatización de las tareas de simulación reduce la posibilidad de errores, de forma que es necesario el uso adecuado de diversas aplicaciones informáticas. Los diferentes flujos de trabajo empleados dependen de la interoperabilidad de las aplicaciones necesarias y de la pericia del operador con cada una de ellas. No obstante, la compatibilidad de datos entre aplicaciones no está exenta de errores de interpretación de datos entre los programas, y siempre es necesaria una comprobación de resultados en estos procesos. Cuando la herramienta de simulación admite importar el modelo geométrico y constructivo definido en una plataforma BIM, aumenta el rendimiento del trabajo. Cuando no, la información constructiva y geométrica ha de definirse internamente en el propio software de simulación. En cualquier caso, la modelización térmica de los edificios exige altos niveles de consumo de tiempo de trabajo de operadores especializados (2). De forma que, para disminuir la posibilidad de error y los tiempos en las tareas del modelado, trabajamos con las herramientas que han demostrado una mayor compatibilidad con los programas de simulación finalmente utilizados (Fig. 1)

## 2.2. Modelos climáticos

Los datos climáticos necesarios para simular el comportamiento térmico de un edificio corresponden con series temporales de parámetros de temperatura, humedad, viento y radiación solar. El objetivo de la simulación determina el periodo temporal y la frecuencia de los datos que representa la serie.

En nuestros estudios se procede a la creación, calibración, validación y ensayo de modelos térmicos de edificios. La frecuencia de los registros en las series de datos climáticos ha de ser mayor en los trabajos de calibración que en los de validación y simulación. En las tareas de calibración y validación los datos climáticos deben coincidir temporalmente con los de monitorización. En procesos de validación y ensayos se utilizan normalmente series horarias anuales en ficheros confeccionados para cada tipo de estudio: estadísticos y representativos del clima de una o varias décadas, o proyecciones climáticas futuras.

La procedencia de datos climáticos puede ser diversa, pero deben garantizar una calidad suficiente. Para la realización de nuestros estudios, disponemos de datos de estaciones meteorológicas validadas y cercanas. Además, recopilamos parámetros del clima exterior, in situ. Hay que considerar que las series de datos anuales utilizadas para las simulaciones energéticas confor-

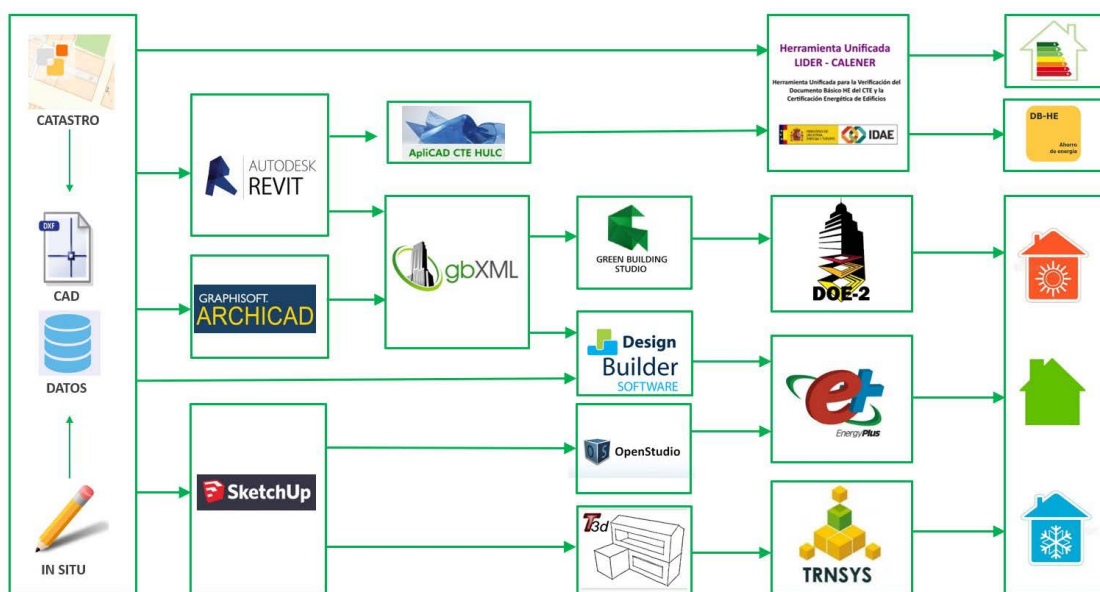


Fig. 1. Flujos de trabajo según herramientas de simulación.

man tablas de al menos 8.760 registros horarios, con tantos campos que como parámetros climáticos sean necesarios. Para las tareas de calibración de los modelos térmicos consideramos una resolución temporal de datos cada 10m., y el número de registros se multiplica por cinco. De forma que, cuando se registran datos climáticos in situ es muy importante disponer de sistemas de monitorización que sean robustos y que aseguren la calidad, la cantidad y la permanencia de toda la información registrada. Por seguridad es importante producir copias periódicas de resguardo de todos los datos, especialmente en largos períodos de monitorización.

Nuestros estudios utilizan datos climáticos medidos in situ. Se han utilizado alguno de estos sistemas: OregonScientific WMR200-THGR810 (6), Domolibre (7) o HOBO-U30NRC (8) para registrar datos ambientales exteriores o interiores, durante los períodos de monitorización. El primer sistema es simple y de bajo coste, tiene capacidad de 6 canales de radiofrecuencia para sensores adicionales tipo THGR810, con 100 m. de alcance, y permite la monitorización de la temperatura y la humedad interior del edificio de forma simultánea. La unidad de control se conecta vía USB a un mini PC con sistema operativo Debian. En este sistema ejecutamos Apache y Weewx, servidor de datos de código abierto, como gestor e interfaz de visualización web de la información climática. El sistema de base de datos es SQL mediante MariaDB en funcionamiento. De esta forma es posible consultar la información en línea y es posible programar copias de seguridad en servidores remotos.

El segundo sistema posibilita la recogida de temperatura y humedad exterior mediante el uso de sensores Si7021A20 (9). Este sistema se describe con mayor detalle en el apartado de monitorización.

Por último, el sistema Hobo con estación U30-NRC dispone de 10 puertos para sensores cableados. Los termohigrómetros ambientales corresponden con el tipo THBM002 de Onset (10). Funciona con o sin alimentación de red. Hemos experimentado una autonomía de funcionamiento de 6 meses en modo batería, registrando datos con todos los canales de sensores en funcionamiento, con una frecuencia de 10 minutos. El software de control es cerrado pero gratuito, no posibilita la visualización remota en línea por sí mismo, y la descarga normal de datos debe realizarse mediante

conexiones periódicas vía USB desde un PC. A título informativo, en la Tabla 1 se muestran los diferentes valores de precisión, resolución y rango de los sensores de temperatura y humedad ambiental exterior de los sistemas presentados.

Tabla 1. Características de sensores higrotérmicos

Fabricante		<i>Oregon Scientific</i>	<i>Silicon Labs</i>	<i>Onset</i>
Modelo		<i>THGR810</i>	<i>Si7021A20</i>	<i>THBM002</i>
HR %	Rango	5 a 95	0 a 100	0 a 100
	Resolución	1	0.2	0.1
	Precisión	± 3	± 3	± 2.5
TEMP °C	Rango	-30 a 60	-40 a 125	-40 a 75
	Resolución	0.1°C	0.02°C	0.02°C
	Precisión	±0.1°C	±0.4°C	± 0.21°C

Las series de datos obtenidas in situ y las obtenidas desde servicios climáticos validados son utilizadas para calibrar y validar los modelos. Previamente se contrastan las mediciones realizadas in situ con las procedentes de las estaciones meteorológicas institucionales más próximas a cada caso, y pertenecientes a AEMET. En nuestros estudios, las series de datos de radiación para las simulaciones siempre provienen de estaciones oficiales. También en casos de pérdidas de datos o cuando el posicionamiento de los sensores no ha sido el idóneo por las circunstancias. En particular, los valores reales de velocidad y dirección del viento que conforma el microclima del entorno de cada edificio son siempre de naturaleza incierta, dado el carácter de fluido que tiene este elemento. La instalación adecuada de anemómetros y veletas en las proximidades de los edificios suele ser problemática. Calcular las presiones del viento sobre la envolvente del edificio teniendo en cuenta los obstáculos del entorno y su propia geometría es un asunto complejo en entornos urbanos. Es posible realizar sofisticados cálculos CFD, pero los resultados son siempre de difícil validación. En nuestros estudios, para superar estas dificultades, las tasas de ventilación natural e infiltraciones calculadas a partir de la presión del viento se convierten en las variables de calibración de los modelos base (11).

El procesado y análisis de series de datos climáticos se ha realizado mediante la siguiente serie de entornos y aplicaciones: MySQL, Weewx y HoboWare, cuando los datos proceden de instrumentación propia; Weather, Elements, Dview y hojas de cálculo para la conversión, visualización y análisis de estos datos. Los formatos de archivo utilizados dependen de la compatibilidad con los programas, y corresponden con CSV, TMY2, TM2, MET y EPW. Para la realización de cálculos de demandas del edificio según los estándares normativos, se utilizan como fuentes los ficheros meteorológicas oficiales puestas a disposición por AEMET y por la Secretaría de Estado de Energía (SEE), correspondientes a la zona climática de su ubicación. Estos responden a formatos BIN (DOE2) y CSV que son transformados a formatos compatibles con el software de simulación de cada estudio.



Fig. 2. Herramienta en línea de AEMET para la obtención de proyecciones climáticas para el siglo XXI.

Para la creación de los datos climatológicos de proyección local, según las afecciones del cambio climático, a medio o largo plazo se utilizan las herramientas de pronóstico y datos de AEMET. Los procedimientos de obtención de estos datos se justifican en estudios realizados con anterioridad (12). En el ámbito del clima litoral mediterráneo consideramos idóneo el empleo del Modelo Global de Circulación (GCM) elaborado por el Max-Planck Institute de Meteorología de Hamburgo (MPI-ESM-LR). Este modelo se utiliza junto a diferen-

tes escenarios de emisiones de Sendas Representativas de Emisión (RCP's) propuestos por el Quinto Informe Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC-AR5), según los objetivos de estudio. Estos datos se obtienen y procesan mediante las herramientas públicas en línea de AEMET (13) que nos proporcionan proyecciones de temperatura a escala regional mediante la utilización de procedimientos estadísticos basados en las técnicas de análogos y de regresión lineal. Estos datos forman series de temperaturas máximas, mínimas y medias diarias para todos los días de un año.

Para la creación de los ficheros climáticos en forma de series horarias, necesarios en las tareas habituales de simulación energética de edificios, se transforman las series de datos obtenidas utilizando un método "morphing". Este procedimiento se basa en tres operaciones (estiramiento, desplazamiento y la combinación de ambas) sobre los valores medios, máximos y mínimos de temperaturas que nos proporciona el sistema de proyección climática de AEMET.

$$[1] \quad x = x_0 + \Delta x_m \times (x_0 - x_{0m})$$

$$[2] \quad x = x_0 + \Delta \alpha_m + (1 - \alpha_m) \times (x_0 - x_{0m})$$

Donde  $\Delta x_m$  es el incremento absoluto del valor medio mensual  $m$  y  $\alpha_m$  es la variación fraccional del valor medio mensual  $m$ . Este método se basa en los estudios de Belcher et al. (14). Los resultados finales que proporciona la aplicación de las fórmulas [1] y [2] son valores horarios de temperatura que se utilizan para la creación de ficheros TM2 o EPW necesarios para la realización de las simulaciones con Trnsys o EnergyPlus.

De esta forma, en los estudios se emplean ficheros de datos climáticos correspondientes a la serie regionalizada del GCM MPI-ESM-LR y a diferentes escenarios RCP obtenidos para el año futuro determinado para cada estudio, y escalados para la localidad de Valencia empleando como base el fichero climático correspondiente a la zona que proporciona la SEE.

Finalmente, los modelos de correspondientes a cada edificio, en sus estados constructivo actual y rehabilitado según estándares normativos, son simulados en los entornos climáticos actuales o de validación,

años tipo, climas normativos y los obtenidos por proyección de posibles climas futuros, que se exija para cada estudio. Para el cálculo del balance térmico de los edificios simulados con Trnsys-16, los datos climáticos obtenidos definitivamente se implementan mediante el Type-99. En el caso de simulaciones con EnergyPlus es necesario la creación de ficheros EPW, STAT, AUDYT y DDY correspondientes mediante la utilidad Weather que proporciona la propia instalación de este programa.

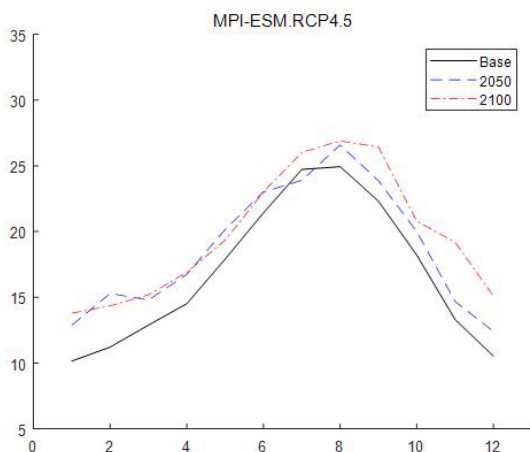


Fig. 3. Proyección por el método del modelo climático MPI-ESM-LR y escenarios con RCP4.5; para los periodos 20148-2052 y 2096-2100 junto a un escenario un base TMY (1961-1990)

### 2.3. Modelos térmicos

Para la creación el cálculo de los modelos numéricos necesarios para las simulaciones es necesaria la utilización de herramientas informáticas para reducir errores y acotar los tiempos de trabajo en la parametrización de las condiciones geométricas, físicas y de operación de cada una las zonas térmicas que componen los modelos, y en las series de cálculos de fenómenos termodinámicos que caracteriza el comportamiento térmico transitorio de los edificios.

Los motores de cálculo empleados en nuestros estudios corresponden con software de Trnsys y de EnergyPlus. El primero es un paquete herramientas de simulación energética de propósito general y flexible, dado que los usuarios pueden definir los modelos matemáticos más adecuados a los propósitos de cada estudio, pero tiene la desventaja de cierta dificultad de uso y

una baja velocidad de procesado. El segundo conjunto de herramientas es específico para la simulación energética de edificios. Normalmente utiliza modelos matemáticos estándar predefinidos para la arquitectura y climatización industrial que permiten obtener una mayor velocidad de ejecución, con la desventaja de una menor flexibilidad para la simulación de Situaciones no estándar. La principal diferencia entre ellas está en el acceso al código fuente, el modo de configuración y la capacidad de control de simulación. Para los propósitos de nuestra investigación ambas herramientas se han usado ampliamente y han permitido la validación de modelos en los márgenes deseados. Sin embargo, estas validaciones han sido realizadas en las diferentes condiciones climáticas y los distintos edificios de cada estudio. En cualquiera de los casos, los dos programas han mostrado resultados suficientemente ajustados entre los valores obtenidos mediante datos experimentales y mediante modelos calibrados. No obstante, todavía no ha sido comprobada la precisión de los resultados que proporcionarían para modelos similares y su comparación. Revisando la literatura científica, se encuentran pocos estudios que analicen esta cuestión. En nuestra investigación la utilización de una u otra herramienta es consecuencia de la disponibilidad de licencias y del perfil del operador responsable de las simulaciones, en cada caso de estudio.

Para los casos de simulaciones con Trnsys se utiliza la versión 16 como interfaz gráfico TrnsBuild y la modelación geométrica a través del Plugin Trnsys3D para Sketchup. El módulo TRaNsient Flow facilita el análisis de la ventilación y las infiltraciones mediante tasas dinámicas procedentes del uso de ventanas en función de forma y grado de apertura. El modelo de edificio es creado utilizando el Type-56 que permite la generación de un modelo geométrico multizona con la información física de las superficies que las forman. Posteriormente, mediante el uso del Type-56 TRNFlow, se calcula la ventilación y las infiltraciones empleando cálculos basados en condiciones externas (velocidad y dirección del viento, temperatura exterior, humedad y radiación solar). Las condiciones climáticas que son necesarias para el cálculo del balance térmico de los edificios son introducidas mediante el Type-99 (15).

Cuando las simulaciones son realizadas con Energy Plus se utiliza la versión 8.6 como motor de cálculo y DesignBuilder V5 como interfaz gráfico. En estos casos, los modelos geométricos y constructivos del edificio y de su entorno se transfieren en formato gbXML desde modelos de plataformas BIM. Este flujo de trabajo facilita una exportación a HULC muy efectiva para la comprobación de valores según estándares oficiales. Lo métodos de simulación Programada y Calculada corresponden a metodologías de la herramienta EnergyPlus. La primera actúa según plantillas temporales de control de la activación de flujos de infiltración y ventilación prefijados. La segunda funciona mediante el módulo Airflow Networks considerando la acción dinámica del viento sobre la definición de una plantilla de grietas y un estado de apertura de los huecos de ventilación, según las preferencias del operador sobre el modelo del edificio. El régimen de apertura de estos huecos puede

ser programado para las diferentes hipótesis, de forma que propicie una ventilación controlada y fluctuante según los valores del viento en los ficheros climáticos. El flujo del aire en el interior del edificio también puede determinarse de forma programada mediante tasas de forma independiente a la acción del viento (16). El valor de infiltraciones y los caudales de ventilación varían para cada escenario de simulación (Fig. 4 y Tabla 2).

Tabla 2. Hipótesis en el estudio de demandas de un tipo arquitectónico simulado con EnergyPlus

Hipótesis	Método de cálculo de infiltraciones	Método de cálculo de la ventilación
1	Programada 7/24	Programada con plantillas 7/24
2	Programada 7/24	Programada con plantillas 7/24
3	Estanqueidad Calculada	Calculada mediante Aiflow Network

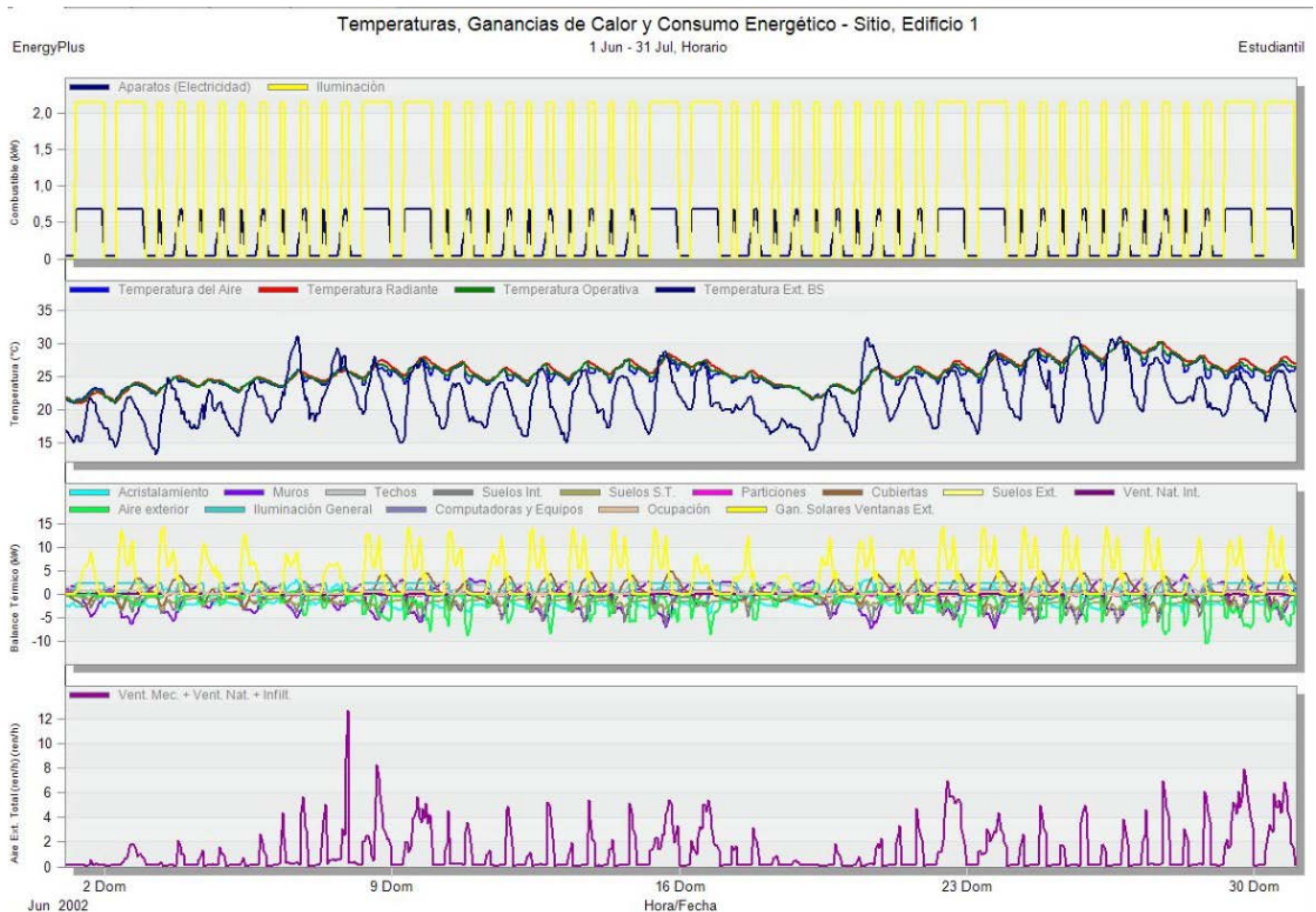


Fig. 4. Gráfico de temperaturas, balance térmico y caudal de ventilación e infiltraciones proporcionado por la herramienta Airflow Networks de EnergyPlus en la simulación de zona de última planta de edificio tipo según su configuración constructiva original y apertura de ventanas programada con la llegada de época estival.

## 2.4. Monitorización de edificios

Como se ha comentado, la caracterización térmica de edificios se ha basado en la monitorización de datos de temperatura y humedad, interior y exterior, recopilados de forma continua durante un año o en largos períodos representativos de cada estación, con una frecuencia de 10m. En algunos casos se ha medido además otro tipo de parámetros como son temperaturas superficiales, velocidades interiores de aire o niveles de CO<sub>2</sub>, en períodos más breves o de forma puntual.

El sistema de monitorización interior empleado para todos los casos corresponde con el de Domolibre. Está diseñado para medir y controlar los dispositivos de forma remota, y es fácilmente escalable. Se basa en módulos inalámbricos autónomos programables de baja potencia diseñados por PanStamp para telemetría y el control de actuadores. Los módulos se comunican a través de las bandas libres de 868-900-915 MHz proporcionando un amplio radio de acción a los sensores. Hemos comprobado una autonomía de funcionamiento de más de 12 meses, con baterías alcalinas simples alimentando los sensores, registrando datos cada 10 min. El carácter abierto de esta tecnología proporciona un acceso libre a información relacionada con su desarrollo, protocolos, plataformas de hardware, bibliotecas de firmware y aplicaciones de software. La unidad de control del sistema de monitorización consiste en un minordenador de bajo consumo, como una puerta de enlace IP inalámbrica con capacidades conectividad directa a Internet y aplicaciones de software de configuración de redes inalámbricas que puede funcionar incluso como servidor de automatización de servicios. Su funcionamiento está basado en Lagarto SWAP, un proceso programado en Python que interactúa entre cualquier red SWAP y el entorno IP. En el lado de IP, proporciona interfaces HTTP y MQ Telemetry Transport (MQTT). Este es un protocolo de mensajería extremadamente simple y liviano basado en publicación-suscripción. Los principios de diseño son minimizar el ancho de banda de la red y los requisitos de recursos del dispositivo mientras se intenta garantizar la confiabilidad y cierto grado de seguridad de entrega. Los principios anteriores también hacen que este protocolo sea ideal para el mundo emergente de “máquina a máquina” (M2M) o “Internet de las cosas” (IoT) de los dispositivos conectados, y

para aplicaciones móviles donde el ancho de banda y la energía de la batería son requisitos esenciales (7).

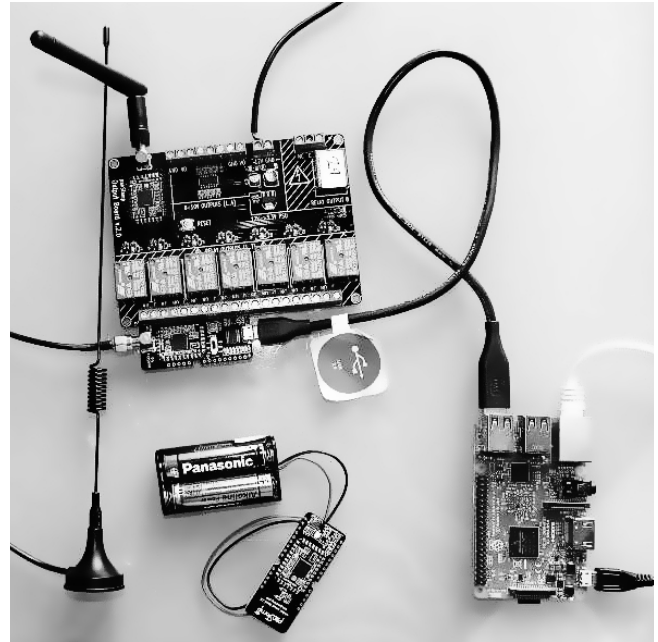


Fig. 5. Sistema monitorización y actuación Domolibre-PanStamp conectado a Raspberry Pi como unidad de control y almacenamiento.

Los dispositivos de esta tecnología utilizados en el campo de la supervisión y el control de edificios han sido objeto de investigación y desarrollo de proyectos desde la plataforma Domolibre.eu proporcionando el software para la visualización web de la información y control del sistema. Consta de los siguientes dispositivos de hardware (Fig. 5) y software (Fig. 6):

- Mini-computer Raspberry Pi
- PanStik 4.0 USB Carrier Board
- Antenna
- Minibat sensor board 2.0 THSi7021
- Output Board with PanStamp NRG
- Modem 3G GSM
- S.O. Raspbian
- Lagarto SWAP – MQTT
- Servidores web Apache y BBDD MariaDB
- Interfaz Web Domolibre

Los datos proporcionados por el sistema de sensores se registran en tablas SQL gracias a las aplicaciones PHP que se ejecutan en el entorno Raspbian. Se realizan copias automáticas y simultáneas de la infor-



mación en el equipo del servidor a través de IP. La visualización de resultados y la gestión de los comandos

de control son de acceso restringido y accesibles desde cualquier dispositivo móvil y navegador web.

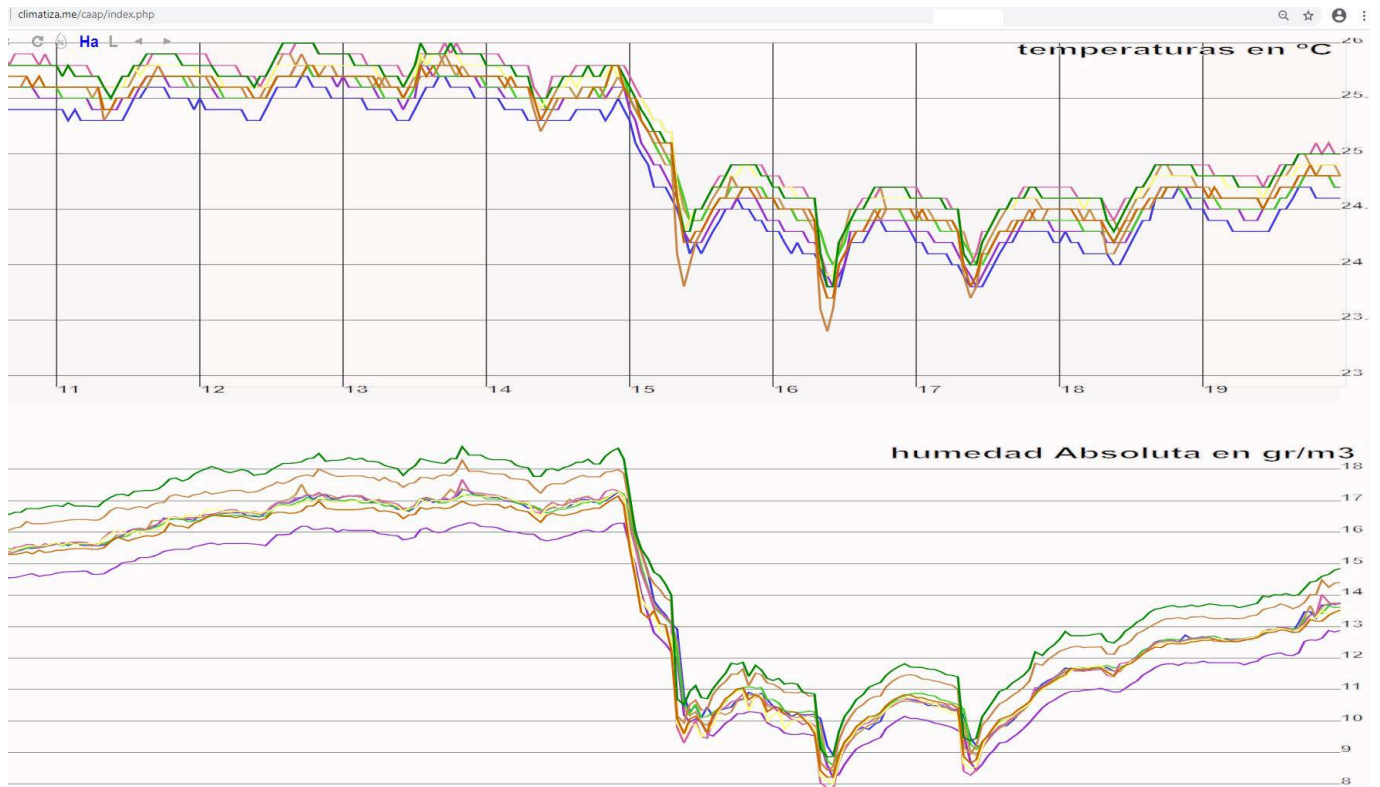


Fig. 6. Pantalla de visualización Domolibre para datos de monitorización de edificio, mediante conexión remota vía http. El gráfico corresponde a los datos de temperatura y humedad de un edificio sin climatización, durante el efecto del fenómeno DANA de octubre de 2019, en Valencia

## 2.5. Calibración de modelos por temperaturas

Una vez definidos los modelos es necesario comprobar su funcionamiento y obtener unos primeros resultados. La comprobación estadística los resultados obtenidos con los datos medidos determinará el grado de correspondencia del modelo simulado con el comportamiento real del edificio. Generalmente los valores en los modos de operación del edificio y el grado de ventilación-infiltraciones del modelo suelen ser los más imprecisos y los causantes de los principales desajustes. La obtención de esta última información no es posible normalmente, ya que es necesario la realización de aparatosos ensayos de estanqueidad. En nuestros estudios utilizamos valores estándar de partida para las tasas de ventilación, cuando esta es programada, y valores conocidos o estandarizados, cuando esta es calculada a partir de los datos del viento del fichero climático. La ca-

libración realizada consiste en el ajuste de estos valores durante periodos vacacionales en los que el edificio no es utilizado y son conocidos los modos de operación que permanecen. La validación de los modelos calibrados se realiza sobre semanas correspondientes a los periodos estacionales objeto del estudio, hasta alcanzar un valor estadístico aceptable.

Las temperaturas interiores son medidas en cada una de las diferentes zonas térmicas del edificio o vivienda objeto de estudio. La temperatura media de todos los sensores de monitorización es el valor de referencia utilizado para la validación de los modelos desarrollados.

Existen varios índices para obtener la calidad de los modelos de simulación de energía del edificio. La mayoría de ellos se describen en la Guía 14- 2014 de ASHRAE. En nuestros estudios utilizamos los indicadores de error de sesgo medio normalizado (NMBE) y el

coeficiente de variación del error cuadrático medio (CV (RMSE)) para comprobar la validez de los modelos (15).

El NBME (error de sesgo medio normalizado) es un indicador de la diferencia total entre los valores medidos  $m_i$  y los simulados  $s_i$ . La ecuación (3) muestra la fórmula para obtener los valores NBME. En procesos de calibración es recomendable igualar  $p$  al valor cero y así normalizar de la escala de índice de error de sesgo medio (MBE) dividiendo por la media de los valores medidos  $m$ . La obtención de valores positivos supone que las predicciones de la simulación están por debajo de los de monitorización, por el contrario, los valores negativos determinan que los resultados de modelización son más altos que los de medición.

$$(3) \quad NBME = 1 \div m \times \sum(m_i - s_i) \div (n - p) \times 100(\%),$$

El CV(RMSE) (coeficiente de varianza de la raíz cuadrada media error) indica la variación entre los valores medidos  $m_i$  y simulados  $s_i$ . La ecuación (2) muestra la fórmula para obtener valores CV (RMSE), y en este caso, se sugiere que el valor de  $p$  sea uno. Este índice verifica la exactitud de las predicciones al expresar la variación de la predicción con respecto a la medición, sin considerar o verse afectado cuando un valor positivo cancela uno negativo.

$$(4) \quad CV(RMSE) = 1 \div m \times (\sum(m_i - s_i)^2 \div (n - p)) \times 100(\%),$$

El criterio de validación de los modelos de tipos arquitectónicos simulados se basa en la comprobar que los valores NBME y CV(RMSE) se mantienen por debajo del 10% y el 30% respectivamente, con simulaciones horarias, tal y como sugiere Guía 14- 2014 de ASHRAE.

### 3. Aplicaciones de la metodología

Los edificios objeto de estudio se han seleccionado tras comprobar su representatividad en el ámbito de la investigación y corresponden con tipos arquitectónicos residenciales edificados durante la primera mitad del siglo XX. que mantienen la configuración constructiva original de los principales elementos de su envolvente. A menudo, los principales elementos de las envolventes de estos edificios gozan de algún tipo de protección histórico-artística. Los resultados que obtenemos en nuestros estudios son también válidos como referentes para el análisis de edificaciones similares que existen en otros lugares del litoral mediterráneo.

Tabla 2. Valores térmicos medios de los sistemas constructivos de la envolvente de los tipos arquitectónicos de estudio

Elementos	Valor U (W/m²K)
Fachadas	1,4 W/m² K
Suelos	2,1 W/m² K
Tejados	1,1 W/m² K
Huecos	5,9 W/m² K
Infiltraciones h <sup>-1</sup>	8,0 h <sup>-1</sup> a 50 Pa (*)

La variación constructiva más importante que se produce durante el período correspondiente a la primera mitad del s. XX consiste en la sustitución de la madera estructural por el hierro, en los elementos estructurales que constituyen las particiones horizontales interiores de las zonas térmicas de los edificios. Si embargo, los principales elementos de la envolvente de estos edificios corresponden de forma invariable con una serie de sistemas constructivos. Las cubiertas son inclinadas y sin aislamiento, se forman con forjados de tipo tradicional de vigas y viguetas de madera con una cubrición de teja tradicional que se asienta con mortero sobre un tablero cerámico que a su vez es sustentado por un entramado de correas y cabirones de madera. Los elementos envolventes verticales corresponden con muros estructurales de fábrica de ladrillo macizo en las fachadas y en las medianeras. Las carpinterías son tradicionales de madera de pino y acristalamientos claros y sencillos.

Los tipos de edificios que constituyen la serie objeto de estudio son los siguientes:

- Unifamiliar aislada, en un entorno suburbano (12).
- Unifamiliar entre medianeras, en un entorno urbano (16).
- Vivienda en bloque, en un entorno urbano.
- Bloque de apartamentos en un entorno urbano.

Las referencias a los estudios publicados se encuentran disponibles en la bibliografía de este informe. Los resultados del resto de estudios y las conclusiones de la investigación están pendientes de su publicación.

## Bibliografía

- (1) Linares, P., Declercq, D., Labandeira, X., Romero, X., Chaves, J. y Ramos, A. (2017). Escenarios para el sector energético en España. *Economics for Energy*, 62-62
- (2) Pérez, V., Castilla, F. (2017). Modelado y simulación energética con herramientas BIM. Trabajo presentado en el congreso internacional EUBIM2017, Valencia.
- (3) Shi, X., Si, B., Zhao, J., Tian, Z., Wang, C., Jin, X. y Zhou, X. (2019). Magnitude, causes, and solutions of the performance gap of buildings: A review. *Sustainability*, 11, (3), 1-21.
- (4) Blázquez, T., Suárez, R. y Sendra, J. (2015). Towards a calibration of building energy models: A case study from the Spanish housing stock in the Mediterranean climate. *Informes de la Construcción*, 67 (540), 1-11. doi: 10.3989/ic.1581.
- (5) Edificios destinados principalmente a vivienda familiar según número de plantas sobre la rasante y el año de construcción. 2011. Recuperador de [http://www.valencia.es/ayuntamiento/webs/estadistica/Anuario/2019/XLS\\_Cast/Cap04.xlsx](http://www.valencia.es/ayuntamiento/webs/estadistica/Anuario/2019/XLS_Cast/Cap04.xlsx)
- (6) Oregon Scientifics WMR200. Especificaciones. Recuperado de [http://wiki.meteoclimatic.net/wiki/Oregon\\_Scientifics\\_WMR200](http://wiki.meteoclimatic.net/wiki/Oregon_Scientifics_WMR200)
- (7) Pérez, V., Aparicio, C., Vivancos, J. (2018) Open source domotic system for reducing the energy demand of buildings. Trabajo presentado en el 1st International conference on Data for Low Energy Buildings, Murcia.
- (8) Hobo U30 USB Weather Station Data Logger, Documentation. Recuperado en <https://www.onsetcomp.com/products/data-loggers/u30-nrc/Si70221-A20>, Silicon Labs, Features. Recuperado de <https://www.silabs.com/documents/public/data-sheets/Si7021-A20.pdf>
- (9) S-THB-M002, Onset, documentation. Recuperado en <https://www.onsetcomp.com/products/sensors/s-thb-m002/>
- (10) Orme, M., Liddament, M., Wilson, A. (1998). Numerical Data for Air Infiltration - Natural Ventilation Calculations. The Air Infiltration and Ventilation Centre. University of Warwick.
- (11) Pérez, V., Aparicio, C., Martínez-, A. Vivancos, J.L., (2018). Impact of climate change on heating and cooling energy demand in a residential building in a Mediterranean climate. *Energy*, Elsevier, vol. 165(PA), pages 63-74. DOI: 10.1016/j.energy.2018.09.015
- (13) AEMET, Servicios climáticos, Proyecciones climáticas para el siglo XXI. Recuperado en [http://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/cambio\\_climat/datos\\_diarios](http://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/cambio_climat/datos_diarios).
- (14) Belcher, S., Hacker, J., Powell, D. (2005). Constructing design weather data for future climates. *Building Services Engineering Research and Technology*. University of Warwick. doi:10.1191/0143624405bt112oa.
- (15) Aparicio, C., Vivancos, J.L., Cosar, P., Buswell, R. (2019). Energy Modelling and Calibration of Building Simulations: A Case Study of a Domestic Building with Natural Ventilation. *Energies*, 12 (17), 3360. doi.org/10.3390/en12173360
- (16) Pérez, V., Aparicio, C., Vivancos, V. (2019) Test of long-term energy demands for the rehabilitation of a Mediterranean residential historic building. Trabajo presentado en el 23rd International Congress On Project Management, Málaga.

# La monitorización en la evaluación de soluciones de protección solar en edificios terciarios

Valoración de variables energéticas,  
ambientales y de calidad del  
medioambiente interior

TEP 130. UNIVERSIDAD DE SEVILLA (US)

**C.M. Calama-González (1), R. Suárez (2), A.L. León-Rodríguez (3), R. Escandón (4), A. Alonso (5)**

(1) Arquitecto. IUACC, E.T,S, de Arquitectura, Universidad de Sevilla, Sevilla (España)

(2) Dr. Arquitecto. Profesor titular. IUACC, E.T,S, de Arquitectura, Universidad de Sevilla, Sevilla (España)

(3) Dr. Arquitecto. Profesor titular. IUACC, E.T,S, de Arquitectura, Universidad de Sevilla, Sevilla (España)

(4) Dra. Arquitecto. IUACC, E.T,S, de Arquitectura, Universidad de Sevilla, Sevilla (España)

(5) Dra. Arquitecto. IUACC, E.T,S, de Arquitectura, Universidad de Sevilla, Sevilla (España)

Persona de contacto/Corresponding author: [rsuarez@us.es](mailto:rsuarez@us.es) (R. Suárez)

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6511-2885> (C.M. Calama-González); <http://orcid.org/0000-0001-6136-1596> (R. Suárez); <http://orcid.org/0000-0003-3466-7850> (A.L. León-Rodríguez); <http://orcid.org/0000-0003-0531-698X> (R. Escandón); <https://orcid.org/0000-0002-0321-1730> (A. Alonso)

## La monitorización en la evaluación de soluciones de protección solar en edificios terciarios

### RESUMEN

El calentamiento global tendrá un impacto significativo en la demanda y consumo energético de edificios existentes, especialmente en los más vulnerables, ubicados en climas cálidos y con un porcentaje elevado de superficie acristalada. El uso de sistemas de protección solar es una estrategia pasiva de rehabilitación viable, económica y de fácil implementación para hacer frente a este fenómeno. Este trabajo analiza cómo diferentes sistemas de protección solar influyen en el comportamiento térmico-energético y en la calidad ambiental interior de los edificios, comparando, de forma simultánea, datos monitorizados en un escenario rehabilitado y no rehabilitado. Además, los datos obtenidos del proceso de monitorización, se utilizan para validar modelos de simulación energética y elaborar modelos numéricos dinámicos.

**Palabras clave:** edificios terciarios; sistemas de protección solar; comportamiento energético; calidad ambiental interior; confort térmico; calidad de aire interior.

## *Monitoring for assessing solar protection solutions in commercial buildings*

### ABSTRACT

*Global warming will have a significant impact on energy demand and consumption in existing buildings, especially those more sensible to higher temperatures, such as the ones located in warmer climates and with a noticeable percentage of glazing surface. Using solar protection systems is a key strategy for viable, economical and easy-implementing retrofitting solution, in order to tackle this phenomenon. This research assesses how different solar protection systems influence on the thermal and energy performance of buildings, as well as on the indoor environment quality. To do so, a simultaneous comparison between monitored data from a non-retrofitted and a retrofitted scenario is conducted. Moreover, data obtained from the monitoring process is used to validate energy simulation models and to develop dynamic and numerical models.*

**Keywords:** *tertiary buildings; solar protection systems; energy performance; indoor environment quality; thermal comfort; indoor air quality.*

## 1. Introducción

El incremento de las temperaturas exteriores debido al cambio climático repercute significativamente en el consumo energético, sobre todo en edificios existentes, derivando con frecuencia en problemas de sobrecalentamiento interior, así como inadecuadas condiciones de confort térmico y calidad del aire (1). Estos fenómenos son más acusados en los climas cálidos del sur de Europa (2), como el Mediterráneo, y en edificios con un importante porcentaje de superficie acristalada y donde las cargas internas por ocupación son notables dentro del balance térmico.

Está generalmente aceptado por la comunidad científica que la rehabilitación energética de edificios existentes es clave para la reducción de los costes energéticos (3). No obstante, determinar cuáles son las mejores medidas de intervención es uno de los principales retos del proceso de rehabilitación. Las estrategias pasivas de intervención se han focalizado principalmente en medidas de ahorro de consumo, es decir, en criterios energéticos y térmicos (4), quedando relegados a un segundo plano parámetros como los niveles de iluminación o la calidad de aire interior, pese a su relación directa con el confort y la salud.

Uno de los enfoques para la mejora de la calidad ambiental interior y las condiciones de confort junto con una reducción de la demanda energética en edificios existentes es el empleo de sistemas solares pasivos, dado que los huecos concentran la mayor parte de las ganancias de calor de la envolvente, especialmente en edificios terciarios, donde el porcentaje de superficie acristalada suele ser sensiblemente elevado.

El grupo TEP 130 “Arquitectura, Patrimonio y Sostenibilidad: Acústica, Iluminación y Energía” de la Universidad de Sevilla (5) centra una de sus líneas prioritarias de investigación en la rehabilitación ambiental en edificios existentes mediante la diagnosis y la propuesta de estrategias de intervención.

Dentro de esta línea se inscribe el proyecto del Plan Estatal I+D+i “Retos investigación” (2015-2018) denominado “SUB-UMBRA. La rehabilitación energética de edificios de uso terciario en clima mediterráneo mediante la optimización de los sistemas de protección solar” (6) (BIA2014-53949-R). El objetivo principal de este proyecto

ha sido la optimización de los sistemas de protección solar de fachadas de edificios terciarios en clima mediterráneo para reducir su consumo mediante una valoración simultánea en dos espacios a partir de la monitorización de variables ambientales, de eficiencia y ahorro energético.

El principal objetivo de este trabajo es exponer la metodología de monitorización aplicada por el grupo de investigación TEP-130 en la monitorización de edificios terciarios del área mediterránea, como medio de caracterización energética y de evaluación de soluciones pasivas de rehabilitación del parque edificatorio para la mejora de las variables energéticas, ambientales y de calidad del medioambiente interior.

## 2. Sistemas y protocolos de monitorización

La metodología empleada, aplicada a diferentes tipologías edificatorias, se basa en la monitorización in situ de variables ambientales y energéticas interiores en edificios, concretamente en dos espacios colindantes y con similares características geométricas y físico-construtivas: uno sin rehabilitar, como caso de referencia, y otro que incorpora la estrategia de rehabilitación propuesta, en este caso, un sistema de protección solar. El objetivo pretendido es la evaluación simultánea de ambos espacios, bajo las mismas condiciones climáticas exteriores, y con similares condiciones reales de uso y ocupación.

### 2.1. Variables monitorizadas

Mediante el sistema de monitorización se han valorado las siguientes variables:

- Eficiencia energética: demanda energética y consumo eléctrico de los sistemas de climatización, iluminación y ventilación.
- Calidad ambiental interior: temperaturas interiores, humedad relativa, iluminancia natural interior, niveles de radiación solar, concentraciones de CO<sub>2</sub>, confort térmico, comparativa de escenarios de ventilación...
- Comportamiento del usuario y su influencia en variables que están bajo su control (apertura de ventanas, nivel de apertura de persianas, presencia de personas, activación del sistema de iluminación artificial...)
- Prestaciones de los sistemas de protección solar.

## 2.2. Periodo de monitorización

Se ha realizado una monitorización durante un año completo, lo que permite que los resultados de la investigación se analicen en base a tres periodos estacionales diferenciados y representativos: verano, invierno y media estación. Para la realización de valoraciones individualizadas de algunas variables se plantean protocolos específicos con una duración mínima de dos semanas. Este enfoque también posibilita la valoración y comparación entre periodos con y sin ocupación.

## 2.3. Sistema de monitorización. Tratamiento de datos

Cada caso de estudio dispone de un sistema de monitorización integrado por diversos data loggers, donde se almacena la información de las variables monitorizadas, en intervalos de medición de 10 minutos. Cada espacio monitorizado cuenta con su propio cuadro de monitorización, donde se localizan los concentradores (Figura 1). La información almacenada regularmente en los data loggers, es subida cada 30 minutos a un FTP (File Transfer Protocol), mediante una tarjeta de móvil con una dirección IP estática. Además, el sistema está



Figura 1. Cuadro de monitorización tipo.

conectado a varios equipos de alimentación ininterrumpida (SAI), que garantizan su funcionamiento durante un tiempo limitado, en caso de fallo del suministro eléctrico.

El acceso remoto a los datos monitorizados puede realizarse, bien a través de su descarga desde el FTP (en formato .txt), o bien mediante un portal web html que, además de la visualización, permite la modificación de la configuración del sistema y de los sensores.

El fichero .txt con la información monitorizada es procesado y limpiado de forma previa a su interpretación, eliminando mediciones duplicadas, generadas en las diversas copias de seguridad que el sistema hace cada media hora. Para ello, la información se exporta a un formato tipo .csv, para su lectura en Microsoft Excel. La interpretación de datos y análisis estadístico de los resultados se lleva a cabo mediante el módulo Statistics Toolbox de Matlab. No obstante, se han empleado de forma complementaria otros programas de análisis como Microsoft Excel, Stata, Statgraphics o SPSS.

Pese a que las mediciones se realizan cada 10 minutos, la resolución con la que se trabaja en el análisis y difusión de resultados de las variables ambientales y energéticas evaluadas es horaria, determinados a partir de los valores medios. Esto se debe a que las simulaciones energéticas y los resultados obtenidos se difunden frecuentemente en la comunidad científica con resoluciones horarias.

En la Tabla 1 se han recogido los diferentes sensores y sondas que integran el sistema de monitorización instalado en los casos de estudio, indicando también sus principales características técnicas.

De forma complementaria, para el registro de las condiciones ambientales exteriores se emplea una estación meteorológica local, ubicada sobre unas celdas de ensayo pertenecientes al grupo de investigación (7). Los sensores que integran esta estación meteorológica y sus características técnicas se indican igualmente en la Tabla 2. Alternativamente, se utilizan los datos cedidos por la Agencia Estatal de Meteorología de España (temperatura, humedad relativa, radiación solar, velocidad y dirección del viento y precipitaciones) tras verificar su idoneidad con mediciones puntuales in situ de comprobación.



### 3. Casos de estudio

#### 3.1. Edificios analizados

En el proyecto SubUmbra se aplica esta metodología a dos casos de estudio, concretamente a edificios terciarios públicos: uno educativo (Figura 2) y otro hospitalario (Figura 3), ubicados ambos en Sevilla (clima Mediterráneo, zona climática B4 según el CTE DB HE) (8).

El edificio educativo es el centro público IES Martínez Montañés (Figura 4), con una tipología lineal, construido en 1967 y reformado en 1998. Se han monitorizado dos aulas contiguas en la planta segunda. La dimensión de las aulas es de 6.95 m de ancho y 6.85 m de largo, con una superficie útil de 45.65 m<sup>2</sup> y una altura libre de 3.20 m. Ambas aulas disponen de cuatro módulos de ventanas (1.40 x 2.40 m) correderas de aluminio y un vidrio simple de 4 mm orientados al sur, ocupando un 53 % de la superficie en fachada de cada aula.



Figura 2. Aula tipo monitorizada en el edificio educativo.

Cada aula tiene capacidad para 35 alumnos, más el docente. En ella se imparten clases en horario de mañana (9:00-15:00, para educación secundaria) y de tarde (17:00-20:00, para educación de adultos).

El segundo edificio estudiado es el Hospital Público Universitario Virgen Macarena (Figura 5), construido en 1975. Se han monitorizado dos habitaciones contiguas de la quinta planta del ala sureste. Las dimensiones de estas habitaciones son 3.65 m de ancho y 5.45 m de largo, con una superficie útil total de 22.50 m<sup>2</sup> y una altura libre de 2.70 m.

Ambas habitaciones disponen de un hueco exterior (2.30 x 0.85 m), que representa un 20% de la superficie de la fachada de cada estancia. Las ventanas, con dos hojas simétricas de aluminio y vidrios dobles 4/8/4, están instaladas a una distancia de 0.30 m de la fachada, formando un voladizo continuo a lo largo de cada hueco.

Cada habitación dispone de tres camas para pacientes y tres sillones para sus acompañantes. En general, la habitación ha estado ocupada de forma prácticamente permanente durante el periodo de monitorización.

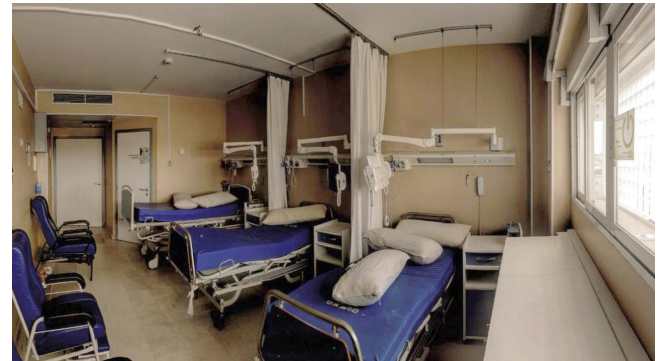


Figura 3. Habitación tipo monitorizada en el edificio hospitalario.

Tabla 1. Variables ambientales y energéticas interiores monitorizadas: listado de sondas por espacio.

Tipo	Variable	Sonda	N°	Ubicación	Ud.	Rango medición	Precisión
Calidad del aire interior	Temperatura superficial	Termopar	7	Interior: paredes y techo, formando una malla.	°C	-30 +350	$\pm 1 \pm 0.75\%$
	Temperatura aire	Termómetro	4		°C	-40 +80	$\pm 0.2^\circ\text{C}$ (0-40 °C) $\pm 0.2^\circ\text{C}$ (40-80 °C)
	Humedad relativa	Higrómetro	4		%	0-100	$\pm 1.5\%$ (0-90%) $\pm 2.5\%$ (90-100%)
	Iluminancia natural	Luxómetro	4		ppm		$\pm(40 \text{ ppm} + 4.8\%)$
	Concentraciones CO <sub>2</sub>	Detector CO <sub>2</sub>	1	Interior	lux	0-2.000	$\pm 4.0\%$
	Presencia	Detector PIR	1		Sí/No	4-15 m	-
	Apertura ventana	Contacto	4	Exterior: ventana y persiana	Sí/No	-	-
	Nivel apertura persiana	Nivel láser	1		mm	200-8.000	$\pm 25 \text{ mm}$
	Radiación solar	Piranómetro	1	Exterior. Posición vertical.	W/m <sup>2</sup>	0-4.000	$\pm 2.0\%$
	Radiación solar (infrarroja)	Pirgeómetro	1		W/m <sup>2</sup>	-300, +100	$\pm 3.0\%$ (-10, 40°C)
Eficiencia energética	Tensión	Voltímetro	1	Panel eléctrico	V	-	-
	Corriente	Amperímetro	1		A	-	-
	Potencia	Potenciómetro	1		W	-	-
	Energía	Medidor energía	1		kWh	-	-

Tabla 1. Variables ambientales exteriores monitorizadas: listado de sondas en la estación meteorológica.

Variable	Sonda	N°	Ubicación	Ud.	Rango medición	Precisión
Temperatura aire	Termómetro	2	Estación Meteorológica	°C	-40,+80	$\pm 0.15 \pm 0.1\%$
Humedad relativa	Higrómetro	1		%	0-100	$\pm 3\%$ (0.70%) $\pm 5\%$ (71.10%)
Iluminancia natural	Luxómetro	1		lux	0-200000	$\pm 3.0\%$
Concentraciones CO <sub>2</sub>	Detector CO <sub>2</sub>	1		ppm	0-2.000	$\pm 2.0\%$
Velocidad viento	Anemómetro	1		m/s	0-50	$\pm 0.5$
Dirección viento	Veleta	1		°	0-360	$\pm 2.5$
Radiación solar: global horizontal, difusa, norte, sur, este y oeste.	Piranómetro	6		W/m <sup>2</sup>	0-2000	$\pm 1.5\%$

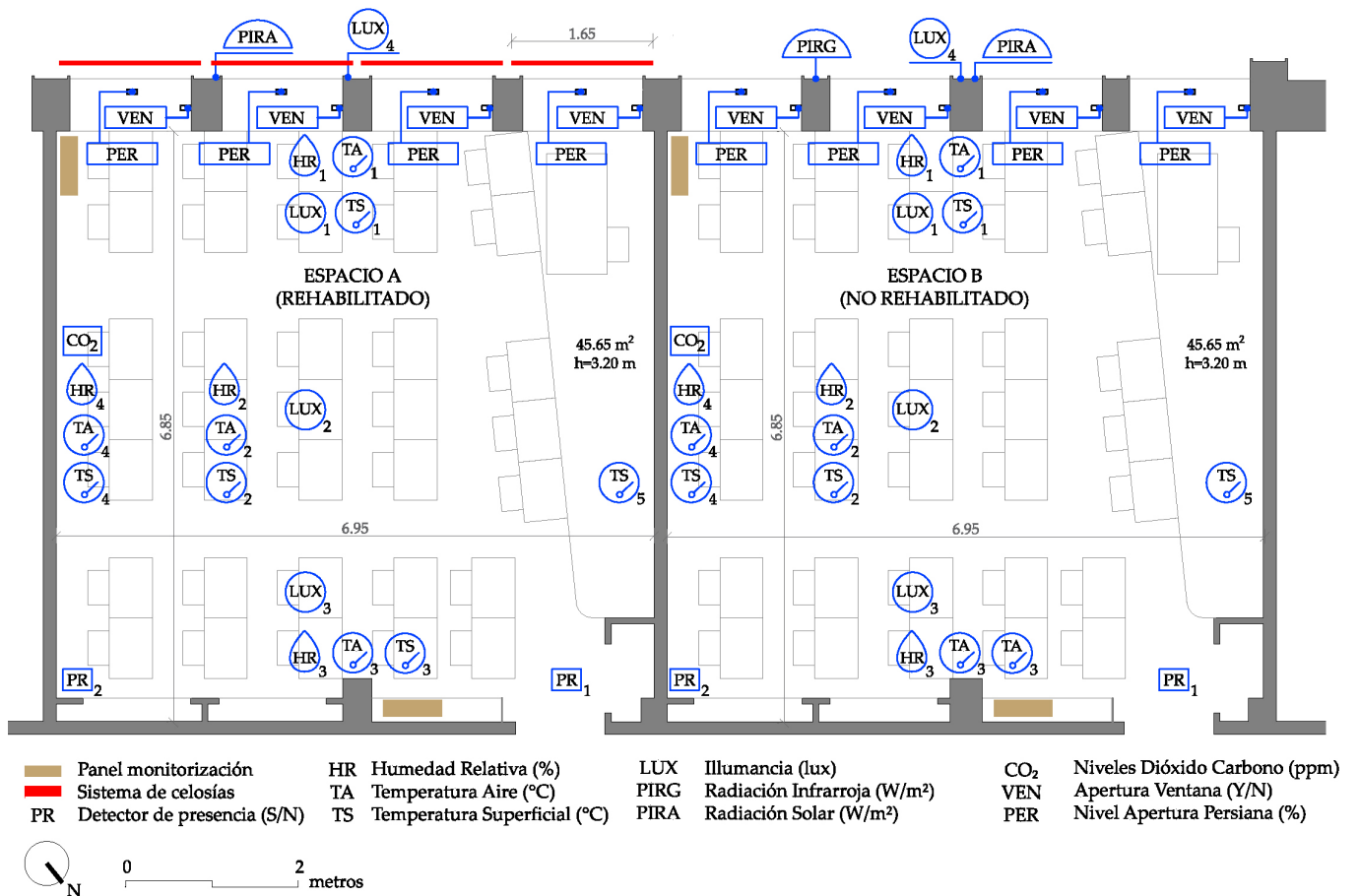


Figura 4. Aulas monitorizadas en el edificio educativo. Se incluye la localización de los sensores y elementos de protección solar.

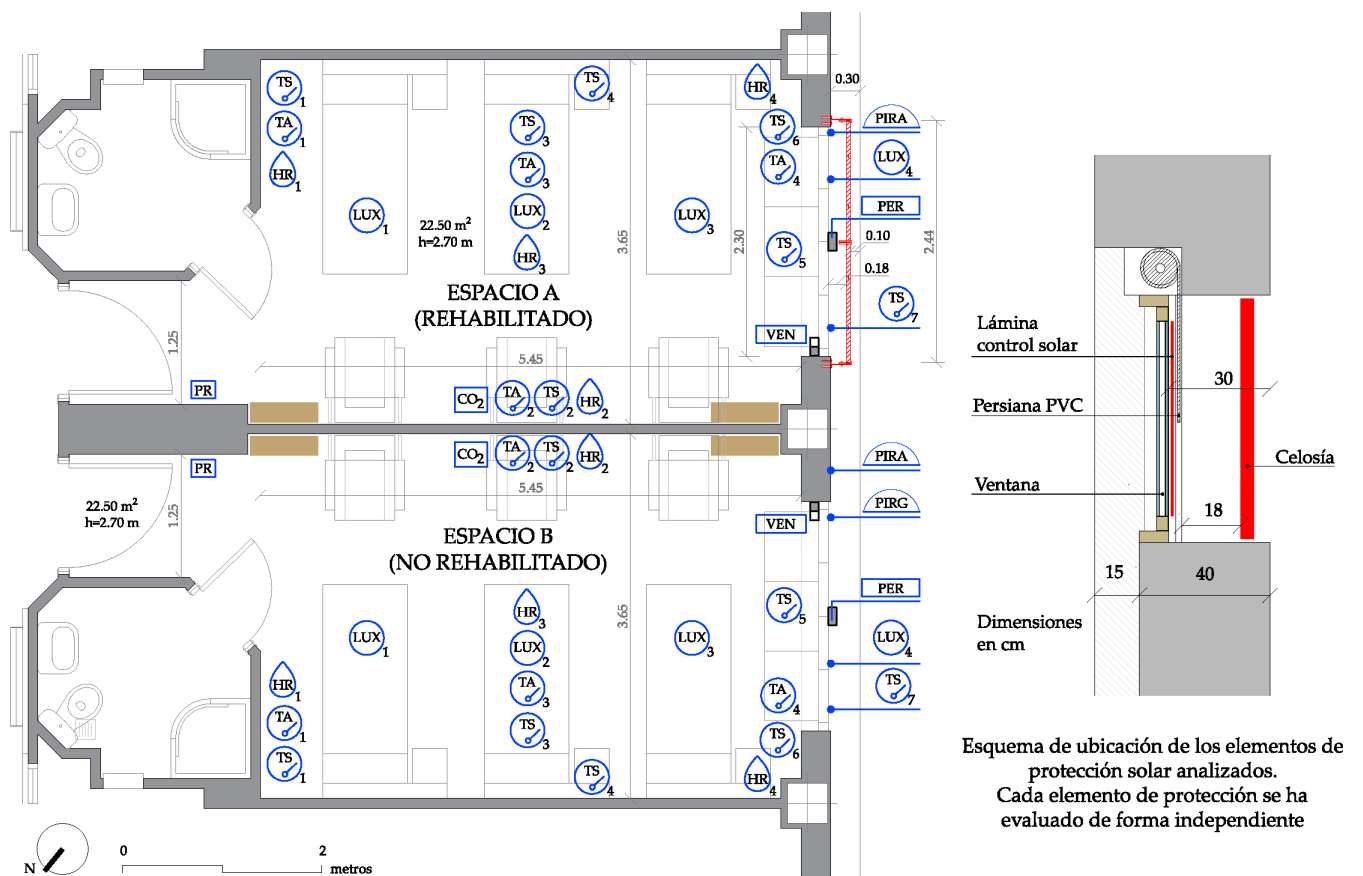


Figura 5. Habitaciones monitorizadas en el edificio hospitalario. Se incluye la localización de los sensores y elementos de protección solar.

### 3.2. Sistemas de protección solar

Se ha llevado a cabo una evaluación de tres tipos de sistemas de protección solar diferentes: celosía exterior, persiana exterior y film solar.

En primer lugar, se ha analizado un sistema exterior de protección solar integrado por una serie de lamas machihembradas de metacrilato blanco, que se ensamblan formando una retícula en celosía (egg-crate), con dimensiones optimizadas según la orientación. En el edificio educativo se emplean lamas de 3 mm de espesor y 30 mm de profundidad, formando rectángulos de 43x43 mm. La distancia entre la celosía y el vidrio es de 0.35 m, con una separación de 0.20 m a la línea exterior de fachada (Figura 6). En el hospital, se han utilizado lamas de 3 mm de espesor y 45 mm de profundidad, formando una retícula de cuadrados de 83 mm de lado. La distancia entre la protección y el vidrio es de 180 mm, siendo de 100 mm al plano exterior de la fachada (Figuras 7 y 8).

También se ha evaluado el empleo de un sistema exterior de persiana enrollable formada por lamas horizontales de PVC.

Por último, en el hospital se ha analizado la influencia de una lámina solar, instalada por la cara exterior de la ventana. La lámina tiene una reflexión y absorción solar del 65 % y 24 %, respectivamente, y una transmisión de rayos UV del 1 %.

## 4. Resultados y conclusiones

El empleo de un sistema de monitorización simultánea entre dos recintos, uno en condiciones de estado actual, empleado como caso de referencia, y otro que incorpora una solución de rehabilitación, mediante sistemas de protección solar, se convierte en una necesaria herramienta para afrontar la rehabilitación de edificios terciarios existentes. El establecimiento de protocolos de monitorización, junto con un posterior análisis estadístico descriptivo de la información monitorizada, permiten obtener resultados y conclusiones muy diversas.

De forma generalizada, la disposición de una celosía de protección solar, de fácil montaje y bajo coste, supone una mejora de la eficiencia energética y de la calidad del ambiente interior, si bien ésta queda condicionada al



Figura 6. Celosía de protección solar en el edificio educativo.



Figura 7. Edificio hospitalario (izquierda) y celosía de protección solar instalada (derecha) localización de los sensores y elementos de protección solar.



Figura 8. Localización del pirgeómetro y piranómetro detrás de la celosía de protección solar en el edificio hospitalario.

comportamiento del usuario, principalmente en relación a los niveles de apertura de persiana, apertura de ventanas y activación del sistema de iluminación artificial.

Se han evaluado los efectos de la celosía sobre la radiación solar incidente (9), reduciéndose ésta un 30-40 % en invierno y, un 45-50%, en verano y media estación. Esto deriva en una reducción de las cargas térmicas, con la consiguiente disminución del consumo eléctrico anual de los sistemas de climatización (10), en torno al 20 %.

En el caso en el que se dispone de forma adicional a la celosía de protección solar un voladizo de hasta 30 cm, la reducción de los niveles de radiación solar incidente, no es tan significativa, alcanzándose porcentajes menores (entre 40-30 % en verano y entretiempo, y en torno al 15 % en invierno).

A pesar de la disposición de la protección solar, existe una mejora de los valores de iluminancia natural interior (9,10), ya que los niveles de apertura de persiana (variable controlada por los usuarios) son generalmente superiores durante un mayor porcentaje de horas.

Además, el empleo de una celosía de protección solar conlleva a una reducción significativa de los consumos eléctricos anuales de iluminación artificial, alcanzándose incluso hasta un 50% de ahorro de electricidad, con la consecuente reducción de las emisiones de los kgCO<sub>2</sub> por kWh de electricidad generada en España (10,11).

Si bien la disposición de protección solar supone una reducción de la temperatura interior en periodos con mayor radiación solar en los espacios sin ocupación, cuando éstos son ocupados, la reducción de la radiación solar apenas tiene influencia en las temperaturas interiores, debido a la alta carga interna por ocupación y a que los usuarios controlan libremente la apertura de las persianas y de las ventanas (9). El inadecuado uso de la persiana y de las ventanas supone una reducción del porcentaje de las horas de confort, tanto en verano como en invierno.

También se ha evaluado la calidad de aire interior, analizando las concentraciones de CO<sub>2</sub>, comparando varios escenarios de ventilación y estudiando la influencia del usuario en la apertura de ventanas y niveles de apertura de persiana (12). Los niveles de CO<sub>2</sub> se sitúan por encima de los valores de 1500 ppm durante un 25-50 % de las horas en confort térmico, lo

que manifiesta la necesidad de disponer adecuados sistemas de ventilación mecánica variable en función de los niveles de CO<sub>2</sub>.

El empleo de un film solar en la cara exterior de la ventana, también implica ahorros importantes en el consumo eléctrico del sistema de iluminación artificial en verano, próximos al 30%. Pese a que con este sistema de protección la iluminancia interior se reduce de forma generalizada, al mismo tiempo se consigue una mayor uniformidad en los valores de iluminación interior natural registrados en los espacios (13).

La metodología empleada ha permitido con los datos monitorizados validar modelos de simulación energética de los casos de estudio. Las mediciones in situ se han comparado con los resultados de simulación, mediante tres coeficientes estadísticos: NMBE, CVRMSE y R2 (12).

Por otro lado, los datos monitorizados obtenidos también se han empleado para elaborar un modelo numérico de fuente abierta que permite evaluar la transferencia de radiación solar de onda corta a través del sistema exterior de protección solar tipo celosía (14), desarrollando un modelo tridimensional dinámico, validado a partir de los coeficientes estadísticos RMSE y NRMSE.

## 5. Bibliografía

- (1) Santamouris, M., & Kolokotsa, D. (2015). On the impact of urban overheating and extreme climatic conditions on housing, energy, comfort and environmental quality of vulnerable population in Europe. *Energy and Buildings*, 98, 125-133, doi:10.1016/J.ENBUILD.2014.08.050.
- (2) IPCC (2007). Fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. New York: C.E. Hanson.
- (3) Directive 2012/27/EU of the European Parliament and of the Council. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32012L0027&from=EN> (accedido a 10 Mayo 2020).
- (4) Ma, Z., Cooper, P., Daly, D., & Ledo, L. (2012). Existing building retrofits: Methodology and state-of-the-art. *Energy and buildings*, 55, 889-902, doi:10.1016/J.ENBUILD.2012.08.018.
- (5) TEP-130: Arquitectura, patrimonio y sostenibilidad. Acústica, iluminación, óptica y energía. Disponible en: <https://grupo.us.es/grupotep130/es/> (accedido a 10 Mayo 2020).
- (6) Proyecto Sub-Umbra: la Rehabilitación Energética de Edificios de Uso Terciario en Clima Mediterráneo Mediante la Optimización de los Sistemas de Protección Solar (ref. BIA 2014-53949-R). Proyectos I+D+I "Retos de Investigación". Convocatoria 2014. Programa estatal de investigación, desarrollo e innovación orientada a los retos de la sociedad. Ministerio de Economía y Competitividad. Dirección General de Investigación Científica y Técnica. Subdirección General de Proyectos de Investigación. Gobierno de España. Duración: 2015-2018.
- (7) Calama-González, C. M., Suárez, R., León-Rodríguez, Á. L., & Domínguez-Amarillo, S. (2018). Evaluation of thermal comfort conditions in retrofitted facades using test cells and considering overheating scenarios in a Mediterranean climate. *Energies*, 11(4), 788, doi:10.3390/en11040788
- (8) Código Técnico de la Edificación. Documento Básico: Ahorro de Energía. Ministerio de Fomento, Gobierno de España: Madrid, España, 2019.
- (9) Calama-González, C. M., Suárez, R., León-Rodríguez, Á. L., & Ferrari, S. (2019). Assessment of Indoor Environmental Quality for Retrofitting Classrooms with An Egg-Crate Shading Device in A Hot Climate. *Sustainability*, 11(4), 1078, doi: 10.3390/su11041078.
- (10) Calama-González, C. M., Suárez, R., & León-Rodríguez, Á. L. (2018). Thermal and Lighting Consumption Savings in Classrooms Retrofitted with Shading Devices in a Hot Climate. *Energies*, 11(10), 2790, doi:10.3390/en11102790.
- (11) Calama-González, C. M., León-Rodríguez, Á. L., & Suárez, R. (2018). Daylighting and energy performance evaluation of an egg-crate device for hospital building retrofitting in a Mediterranean climate. *Sustainability*, 10(8), 2714, doi:10.3390/su10082714.
- (12) Calama-González, C. M., León-Rodríguez, Á. L., & Suárez, R. (2019). Indoor Air Quality Assessment: Comparison of Ventilation Scenarios for Retrofitting Classrooms in a Hot Climate. *Energies*, 12(24), 4607, doi:10.3390/en12244607.
- (13) Calama-González, C. M., León-Rodríguez, Á. L., & Suárez, R. (2019). Daylighting performance of solar control films for hospital buildings in a Mediterranean climate. *Energies*, 12(3), 489, doi:10.3390/en12030489.
- (14) Domínguez-Torres, C. A., León-Rodríguez, A. L., Suárez, R., & Domínguez-Delgado, A. (2019). Numerical and experimental validation of the solar radiation transfer for an egg-crate shading device under Mediterranean climate conditions. *Solar Energy*, 183, 755-767, doi:10.1016/j.solener.2019.03.05.

# MODIF-HABIT: La experiencia del grupo ABIO-UPM en monitorización aplicada a un proyecto de investigación

Modificación de los hábitos de uso y consumo de energía en la vivienda mediante la visualización de datos en función del contexto climático (MODIF-HABIT)

ABIO. UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID (UPM)

**M. Pérez (1), E. Cuerda, M. Barbero-Barrera, J. Neila**

(1) Investigadora. Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Arquitectura. Departamento de Construcción y Tecnología Arquitectónicas, Madrid (España).

Persona de contacto: [marlix.perez@upm.es](mailto:marlix.perez@upm.es) (M. Pérez), [fjavier.neila@upm.es](mailto:fjavier.neila@upm.es) (J. Neila)

## MODIF-HABIT: La experiencia del grupo ABIO-UPM en monitorización aplicada a un proyecto de investigación

### RESUMEN

El grupo Arquitectura Bioclimática en un Entorno Sostenible (ABIO-UPM) es un grupo consolidado de la Universidad Politécnica de Madrid, con más de 15 años de experiencia, centrado en la arquitectura bioclimática, construcción sostenible y urbanismo ecológico. En el ámbito de la monitorización, cuenta con una amplia trayectoria, que ha sido empleada como herramienta de evaluación de los espacios urbanos y de los edificios. La experiencia acumulada nos ha permitido ponerlo en práctica en el proyecto que se está desarrollando en la actualidad, bajo el nombre MODIF-HABIT, que tiene por objetivo evaluar la incidencia de la visualización de los datos y del contexto urbano en la modificación de los hábitos de uso energético de los hogares. En el presente artículo, y en el marco de la Red Monitor, se recogen algunos de los fundamentos teóricos así como la metodología de monitorización seguida con el fin de que puedan servir de referencia para futuras investigaciones.

**Palabras clave:** Modificación de hábitos de uso; hábitos energéticos; isla de calor; visualización de datos; monitorización; consumo energético.

## *MODIF-HABIT: The experience of the ABIO-UPM research group in housings monitoring projects*

### ABSTRACT

*The research group named Arquitectura Bioclimática en un Entorno Sostenible (ABIO-UPM) is a consolidated group of the Polytechnic University of Madrid, with more than 15 years of experience focused on bioclimatic architecture, sustainable construction and ecological urban planning and design.*

*Regarding monitoring, the research group had a wide experience in different scales from the urban to the building one through different research projects. Based on it, MODIF-HABIT project promoted the correlation among the urban conditions together with energy efficiency and user's behaviour by the evaluation of data visualization over the user's habits.*

*In this article, and within the framework of Red Monitor, the fundamentals of the methodology as well as the protocols and parameters to take into account were collected as practical reference for comparison as well as future research works.*

**Keywords:** *Modification of habits; energy habits; heat island; data visualization; building monitoring systems; energy savings behaviour.*



## 1. Introducción

El sector residencial representa un elevado porcentaje en el consumo energético final del país que ascendía al 18,5% ya en el año 2014 (MINETAD, 2017). Este porcentaje junto con el previsible incremento de las temperaturas, exige la búsqueda de soluciones alternativas para la reducción del consumo energético.

En esta línea, las investigaciones del grupo ABIO-UPM abarcan distintas facetas desde lo urbano al desarrollo de soluciones constructivas innovadoras que den respuesta a la eficiencia energética y a la mejora del confort desde la sostenibilidad, en su más amplio sentido. Uno de ellos es MODIF-HABIT, abriendo una línea específica de investigación basada en los hábitos de los ocupantes de las viviendas que dan lugar a un consumo energético inadecuado. Pero previamente se han desarrollado otros proyectos que cubrían otras ópticas diferentes del problema. Uno de ellos fue INVISO, que a lo largo de 2008 y 2009 permitió a un amplio grupo de investigadores sistematizar un amplio catálogo de estrategias y soluciones constructivas bioclimáticas para ser aplicadas a la industrialización de viviendas. En esa misma línea de industrialización SHERIFF, para sistemas SATE, o SOLCONCER, para la Diputación de Castellón pero centrado en la cerámica de recubrimiento. Dentro también del mundo de la cerámica, HIDRO-CER, proyecto que desarrolla un elemento para ser usado como un sistema de enfriamiento evaporativo. Pensando en el empleo de la vegetación y la naturación urbana se desarrolló el proyecto ENVELCA junto con otros múltiples trabajos para empresas del sector. Recientemente el proyecto MODIFICA, gracias al cual se pudo obtener como resultado del estudio la isla de calor dinámica de la ciudad de Madrid.

Todos estos proyectos y otros muchos vinculados al desarrollo de tesis doctorales dentro de ABIO-UPM están intentando paliar el incremento de los fenómenos extremos derivados del cambio climático (1) y el aumento de la severidad climática durante los meses de invierno y de verano; todo ello, exige su correcta evaluación para poder planificar medidas de eficiencia energética que estén de acuerdo con las condiciones climáticas futuras. En ellas tiene especial incidencia la dimensión urbana, donde se dan fenómenos climato-

lógicos particulares y de gran importancia, como es el caso de la isla de calor urbana (2; 3). Este fenómeno, que refleja las diferencias de temperaturas existentes entre la ciudad y su entorno no construido, implica con frecuencia variaciones en la temperatura media anual de unos 2-3°C, llegando a registrarse intensidades de hasta +10°C (4; 5). En España, es destacable el caso de Madrid dado que por su tamaño y condición de ciudad de interior y que, tal y como ha quedado constatado por la investigación desarrollada por el grupo en el contexto del proyecto MODIFICA, alcanza intensidades superiores a +5°C (6). Esta circunstancia implica que las simulaciones, lejos de adecuarse a las condiciones reales a las que los edificios están sometidos se evalúan en condiciones mucho más favorables (7).

Con estas premisas y tomando como referencia las lecciones aprendidas por el grupo de investigación, el proyecto que actualmente está en marcha, bajo el nombre MODIF-HABIT aborda la incidencia de la isla de calor urbana en el funcionamiento de las edificaciones y cómo ésta puede estar condicionando o modificando los hábitos de uso y de consumo energético en las viviendas. En efecto, distintas investigaciones han puesto de manifiesto que el consumo energético vinculado a la vivienda no sólo depende de sus características constructivas y tipológicas o del tipo de equipamiento doméstico, sino también de los hábitos de los ocupantes y la forma en la que éstos interactúan con el edificio (8; 9; 10; 11; 12). Desde este punto de vista, la adopción de hábitos más eficientes y responsables en el uso de la energía son fundamentales para reducir los consumos energéticos siendo estas las principales causas por las que las estimaciones de ahorro energético no se están cumpliendo (13). Por lo tanto, para realizar un análisis efectivo de los criterios a adoptar es necesario ampliar el conocimiento sobre la repercusión del contexto urbano; del intercambio de información con y entre usuarios; del potencial de la interacción de los usuarios en el propio diseño y en el control de los equipos y el consumo en el hogar; de la amortización de los desarrollos tecnológicos actuales de medición y visualización avanzada; y del perfil de uso, el económico, y el social. Efectivamente, la combinación compleja de factores personales y contextuales determinan la necesidad de establecer patrones de comportamiento comunes y limitar los

condicionantes internos y externos de dichos patrones, junto con una adecuada selección de métodos efectivos en cada caso.

Por lo tanto, el proyecto MODIF-HABIT propone una visión global del problema del consumo real de energía asociado a los hábitos de los usuarios y a su contexto urbano. En concreto, el proyecto pretende analizar la incidencia real de información e interacción con los usuarios mediante el estudio de casos reales. Los resultados permitirán definir los métodos más efectivos para actuar sobre el consumo energético y reorientar las investigaciones, programas públicos e inversión hacia estos. Además, la vinculación del consumo energético con el emplazamiento y, en concreto, con la Isla de Calor, considerará la necesidad de incorporar modificaciones en los hábitos en función del contexto urbano específico, aspecto que, hasta el momento, no ha sido abordado en su complejidad ni incorporado en el establecimiento de perfiles de uso.

## 2. Instrumentación y protocolos

La amplia experiencia del grupo ABIO-UPM en el ámbito de la monitorización nos ha permitido adelantarnos a posibles amenazas y problemas que pudiéramos encontrarnos a la hora de recoger información e incluso en la recepción de la misma pero también en el análisis de los datos. Atendiendo a ello, a continuación se exponen los equipos empleados y los protocolos seguidos.

### 2.1. Selección de viviendas

El proyecto MODIF-HABIT plantea un análisis comparado de 60 viviendas y perfiles de hogares en tres ciudades: Bilbao, Madrid y Valencia, 20 viviendas por ciudad, en las que la incidencia de la isla de calor es diferente. Sin embargo se ha planteado el análisis de la isla de calor en la ciudad de Madrid, con la intención de que éste sirva de estudio piloto que posteriormente podrá ser extrapolado a otras ciudades.

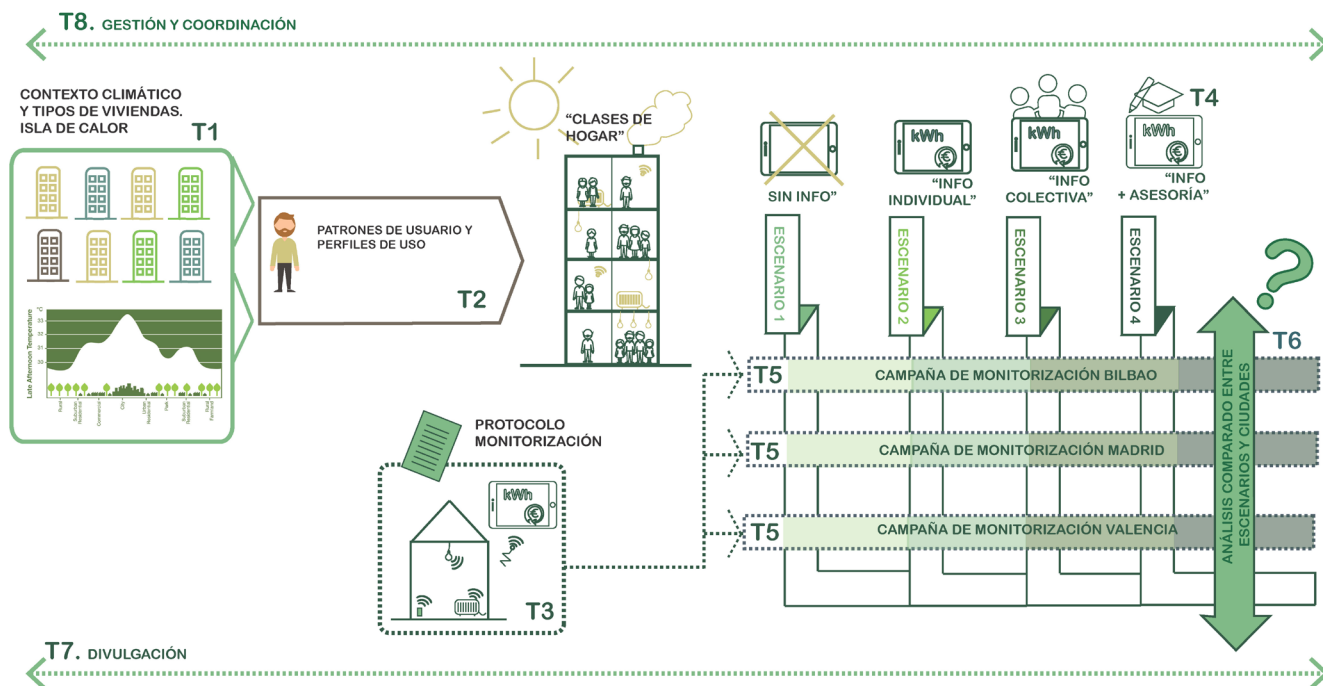


Figura 1. Esquema de metodología de aplicación: clases de hogares y definición de campañas de monitorización y escenarios de estudio.

Dada la importancia de este fenómeno en las ciudades, el primer criterio de selección de viviendas se basó en la ubicación de las viviendas en distintos escenarios: dentro de la isla de calor del centro de Madrid y en la periferia. Se seleccionaron aquellas viviendas cuya ubicación fuera próxima a las 20 estaciones de medición ICU (Medidores de Isla de Calor Urbana) instaladas en el proyecto MODIFICA con los que se estudia la incidencia de la isla de calor en distintos puntos dentro de la ciudad de Madrid. Otro de los parámetros considerados ha sido la tipología de la vivienda y el perfil socio-económico familiar, así como también la disponibilidad e interés por parte de los usuarios.

Con los criterios mencionados previamente se han seleccionado las viviendas, partiendo de la idea de estudiar las diferencias/contrastes que se pueden observar entre las viviendas que se encuentran ubicadas en la periferia, con respecto a las viviendas que se encuentran en la isla de calor de Madrid.

Por otra parte, uno de los aspectos esenciales en la evaluación del comportamiento y uso de las edificaciones es el perfil socio-económico familiar, llegando a identificar los siguientes grupos, Grupo de personas individuales; Grupo de parejas; Grupo de compañeros de piso (3 integrantes); Grupo de familia biparental con un hijo (3 integrantes); Grupo de familia biparental con dos hijos (4 integrantes) o familias monoparentales con un hijo (2 integrantes). Siendo la mayoría de los usuarios/grupos, los conformados por familias biparentales de 4 personas, parejas, seguidos por familias biparentales de 3 personas.

## 2.2. Instrumentos empleados

Dada la dificultad de acceso a las viviendas y las molestias que ello genera sobre los usuarios, se optó por disponer de una plataforma de visualización de datos online que, por una parte, facilitase la adquisición de datos en tiempo real, lo que permite adoptar medidas inmediatas en el caso de detectar el fallo de una sonda o un comportamiento erróneo y por otra parte permite a los vecinos ver sus datos al instante.

En este caso se optó por la adquisición de equipos (tabla 1) de Cliensol Energy, que cuentan con una amplia experiencia en el desarrollo de soluciones de

hardware y software específicos en el campo de la monitorización. Se creó una red donde todos los equipos de monitorización estaban comunicados entre sí en cada vivienda y a su vez nos facilitaron el seguimiento de estos a través de la plataforma de visualización Energy Control Plus.

## 2.3. Protocolos de instalación de equipos

Basados en las investigaciones previas desarrolladas en el grupo de investigación, el diseño de protocolo de monitorización y montaje de equipos empleado se ha desarrollado con el fin de tener los mismos y/o similares parámetros de montaje en todas las viviendas, planteando tres aspectos importantes:

- Registro de mediciones: las mediciones se registraron cada 15 minutos para Madrid y Valencia, mientras que para Bilbao se realizaron cada 10 minutos.
- Montaje/instalación de cada equipo: la instalación del Gateway, transmisor de electricidad y transmisor de gas, se adaptó a las condiciones de la vivienda. La pantalla display con sensor de temperatura y humedad, se ubicó en el salón lo más alejado posible de fuentes de calor/frío (ventanas, radiadores, etc.) y a una altura mayor de 0,90m y menor de 1,50m.
- Registro fotográfico: se tomaron imágenes del montaje de cada equipo, cercanas al mismo equipo, con el fin de recordar cómo ha sido montado (en caso de que sea necesario), y se ha definido el tipo de imagen con el fin de tener imágenes similares de todas las viviendas.
- Comprobación del correcto montaje: se accede a la plataforma de visualización Energy Control Plus para corroborar la comunicación entre todos los equipos y el correcto almacenamiento de las mediciones en la plataforma.

Adicionalmente se han configurado alarmas de fallo de medición durante las últimas 24 horas para cada equipo de medición de cada vivienda, con el fin de actuar y corregir este fallo a la mayor brevedad posible, evitando así la pérdida de datos.

Tabla 1. Equipos de monitorización utilizados en las viviendas.

Imagen	Equipo	Función
	Gateway	Gestiona los sensores de electricidad, gas, temperatura y humedad. Comunicación inalámbrica 150 m.
	Pantalla display, dispone de 2 sensores internos de humedad y temperatura.	Pantalla que muestra la información de los sensores. Necesita el Gateway para envío de datos a la plataforma.
	Transmisor monofásico + Sensor mini 80A	Transmisor para medición de consumo eléctrico total. Necesita el Gateway para envío de datos a la plataforma.
	Transmisor GasSense + sensor contador	Transmisor para mediciones de contadores de GAS con rango de distancia 150 m. Necesita el Gateway para envío de datos a la plataforma.

## 2.4. Protocolo de visualización

El protocolo de visualización diseñado para MODIF-HABIT está dividido en 4 escenarios (Figura 1):

**Escenario 1 – Sin visualización:** en este escenario los usuarios no visualizan ningún dato en la vivienda. Servirá para valorar el uso en condiciones normales de la vivienda, además de para comprobar el correcto funcionamiento de los equipos.

**Escenario 2 – Visualización:** en este escenario los usuarios visualizan su consumo en tiempo real a través

de la pantalla del Gateway y de la pantalla del display con sensor de temperatura y humedad. Se crea un perfil para cada usuario en la plataforma Energy Control Plus para que pueda ver los datos acumulados.

**Escenario 3 – Informe de comparación:** en este escenario se entrega a los usuarios una infografía donde se comparan las mediciones (temperatura, humedad, consumo eléctrico y consumo de gas) de todas las viviendas, para cada ciudad.

**Escenario 4** – Orientación: en este escenario se entrega a los usuarios una infografía que incluye información de cómo cambiar los hábitos de consumo energético en la vivienda y de cómo mejorar las condiciones de confort mediante la implementación de estrategias pasivas.

### 2.5. Protocolos de recogida y análisis de datos

Originalmente en el proyecto se plantearon dos campañas una en verano y otra en invierno, pero el desarrollo del mismo ha llevado a programar tres campañas en Madrid, dos en verano y una en invierno; y dos campañas en Valencia una en invierno y otra en verano. En Bilbao, las mediciones se están tomando de manera continua desde el inicio del proyecto.

Se ha planteado hacer un análisis parcial de cada campaña. En el caso de Madrid el análisis de datos se reagrupa según la ubicación de la vivienda, es decir, si esta está ubicada en zona isla de calor (ICU) o en zona de periferia.

Hasta ahora se ha realizado la campaña de verano 1 de junio – 23 de septiembre 2019 en Madrid y se ha hecho un análisis parcial de este, queda por analizar y comparar los resultados de las encuestas de verano, con respecto a los datos analizados.

También se ha realizado la campaña de invierno 21 de diciembre de 2019 - 21 de marzo de 2020 para Madrid y Valencia. Actualmente se está haciendo un análisis parcial de datos y aún se están recopilando las encuestas de invierno.

En la actualidad queda por realizar la campaña de verano 2020 para Madrid y Valencia.

Durante todas las campañas se cuenta con la plataforma de visualización Energy Control Plus, para hacer seguimiento del correcto funcionamiento de los equipos de medición. En la mayoría de los casos las mediciones han transcurrido sin problemas y los datos han sido descargados y almacenados. En el caso de que algún equipo haya fallado se ha sustituido por uno nuevo.

### 2.6. Programación de Encuestas

Como acción complementaria se ha planteado la realización de encuesta, como método de validación. En estas se han incluido preguntas que faciliten el análisis de los datos.

Se ha planteado realizar una encuesta al inicio del proyecto (durante el montaje de equipos), al terminar cada campaña de verano e invierno, y al finalizar el proyecto (en el desmontaje de equipos).

En las encuestas se registran las condiciones constructivas de las viviendas (acompañado de planos de las viviendas); el perfil del usuario y sus condiciones socio económicas, horario de uso de la vivienda, hábitos de uso y consumo de cada núcleo familiar.

También se han incluido preguntas que permiten valorar las expectativas de los usuarios en lo que respecta a la participación en cada campaña del proyecto.

## 3. Conclusiones

Los 15 años de experiencia del grupo de investigación ABIO-UPM en el contexto de la monitorización permiten ir aprendiendo y poniendo en práctica los aprendizajes adquiridos en cada uno de los proyectos realizados. Junto con la experiencia acumulada hay que destacar el hecho de que los equipos de monitorización son cada vez más económicos, permitiendo mayor acceso a ellos con poco presupuesto.

La investigación MODIF-HABIT nos ha permitido dar un paso más respecto a las campañas de monitorización desarrolladas previamente en el grupo ABIO-UPM. Este proyecto ha permitido determinar unos protocolos más concretos que aseguren el mejor funcionamiento de los equipos, la reducción de posibles fallos y la mejor interacción de los usuarios con los equipos de cara a la visualización de sus propios datos y comprobación de su estado de confort en las viviendas. Además, ha permitido avanzar en la integración de los factores urbanos junto con hábitos de uso para entender el comportamiento de los usuarios y los factores que llevan a la toma de decisiones sobre, por ejemplo, cuestiones tan básicas como los horarios de apertura-cierre de las ventanas para ventilación natural que permiten, por una parte, que las simulaciones que se desarrollen sean más certeras en la predicción del funcionamiento real del edificio pero también que las medidas de eficiencia y ahorro energético tengan en cuenta mayor número de parámetros y otros condicionantes que no se habían contemplado hasta la actualidad.

## 4. Agradecimientos

MODIF-HABIT se está desarrollando con fondos del programa estatal de I+D+i orientada a los retos de la sociedad (2017) 2018-2021.

Los autores del artículo agradecen a Miguel Nuñez Peiró, Helena Lopez Moreno, Sonia Cesteros y Camila Ludueña, su participación en la campaña de montaje de equipos, así como también a todos los usuarios de las viviendas que nos han permitido entrar en sus hogares.

## 5. Bibliografía

- (1) IPCC (2013). Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- (2) Mirzaei P.A. (2015). Recent challenges in modeling of urban heat island. *Sustainable Cities and Society*, pp.1–7.
- (3) Akbari H. & Kolokotsa D. (2016). Three decades of urban heat islands and mitigation technologies research. *Energy & Buildings*, pp. 834-842.
- (4) Santamouris M. (2007). Heat Island Research in Europe: The State of the Art. *Advances in Building Energy Research*, 1(1), pp.123–150.
- (5) Santamouris M. (2015). Analyzing the heat island magnitude and characteristics in one hundred Asian and Australian cities and regions. *Science of The Total Environment*, 512–513, pp.582– 598.
- (6) López Gómez A., López Gómez F., Fernández García, F. & Arroyo Ilera, F. (1988). *El Clima urbano de Madrid: La isla de calor*, Madrid: CSIC. Ministerio de Fomento (2014). *Estrategia a largo plazo para la rehabilitación energética del sector de la edificación en España en desarrollo del artículo 4 de la directiva 2012/27/UE*.
- (7) Núñez Peiró M., Sánchez-Guevara Sánchez C. & Neila González F.J. (2017). Update of the Urban Heat Island of Madrid and Its Influence on the Building's. *Energy Simulation*.
- (8) Hong T., D'Oca S., Turner W.J.N., Taylor-Lange S.C., Chen Y., Corgnati S.P. (2015). An ontology to represent energy-related occupant behavior in buildings. Part II: Implementation of the DNAS framework using an XML schema, *Building and Environment* 94: 196-205
- (9) Guerra-Santin O., Itard L. & Visscher H. (2009). The effect of occupancy and building characteristics on energy use for space and water heating in Dutch residential stock, *Energy and Buildings* 41, 1223–1232.
- (10) Stevensons F. & Leaman A. (2010). Evaluating housing performance in relation to human behaviour: new challenges. *Building Research & Information*, Vol. 38, Issue 5, Special Issue: Housing occupancy feedback: linking behaviours and performance.
- (11) Van Dam S. (2013). *Smart energy management for households (Tesis doctoral)*. Delft University of Technology. Faculty of Architecture and the Built environment, Real Estate and Housing Department.
- (12) Cuerda, E., Guerra-Santin, O., Sendra, J., & Neila, F.J. (2020). Understanding the performance gap in energy retrofitting: Measured input data for adjusting building simulation models. *Energy and Buildings*, 209, 1096– 88.
- (13) Cuerda, E. (2020). *Methodological proposal for adjusting the residential energy simulation models using experimental data (tesis doctoral)*. Universidad Politécnica de Madrid. España proposal for adjusting the residential energy simulation models using experimental data (tesis doctoral). Universidad Politécnica de Madrid. España

# Metodología para la monitorización de un edificio docente

Caso de estudio: Escuela Politécnica de Cáceres

COMPHAS y ROBOLAB. UNIVERSIDAD DE EXTREMADURA (UNEX)

**B. Montalbán (1), B. Muriel (2), M. Lucas (3), S. Barroso (4), P. Bustos (5), P. Núñez (6)**

(1) Dra. Arquitecta. Personal Docente Investigador. Universidad de Extremadura, Cáceres (España).

(2) Arquitecta Técnica. Personal Contratado Investigador. Universidad de Extremadura, Cáceres (España).

(3) Arquitecta Técnica. Personal Contratado Investigador. Universidad de Extremadura, Cáceres (España).

(4) Ingeniero de Telecomunicaciones. Personal Contratado Investigador. Universidad de Extremadura, Cáceres (España).

(5) Dr. Ingeniero Informático. Personal Docente Investigador. Universidad de Extremadura, Cáceres (España).

(6) Dr. Ingeniero de Telecomunicaciones. Personal Docente. Investigador. Universidad de Extremadura, Cáceres (España).

Persona de contacto: [bmposas@unex.es](mailto:bmposas@unex.es) (B. Montalbán Pozas). ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1065-0969> (B. Montalbán Pozas).

## Metodología para la monitorización de un edificio docente. Caso de estudio: Escuela Politécnica de Cáceres

### RESUMEN

La actual situación de ineficiencia energética en los edificios sugiere la creación de una metodología que aborde la implantación de un sistema inteligente de control mediante inmótica social. En este artículo se describe una metodología que, de manera incremental, permite la continua optimización del modelo; y mediante un proceso iterativo va transformando el edificio y los hábitos de sus usuarios. En cada iteración los expertos proponen una serie de estrategias sobre el edificio que serán evaluadas en el siguiente ciclo a través de indicadores definidos a priori. Los resultados han sido obtenidos a través de sucesivas aproximaciones y de la validación práctica de las distintas fases en diferentes escenarios hasta llegar a la versión que está siendo implementada en la Escuela Politécnica de la Universidad de Extremadura, en Cáceres. La experimentación de esta metodología está demostrando que la inmótica social permite encontrar soluciones que potencien el ahorro energético y el confort.

**Palabras clave:** metodología; edificio inteligente; consumo energético; eficiencia energética; confort; monitorización; sensorización; inmótica social; sistema de información.

## *Methodology for the monitoring of an educational building. Case study: School of Technology of Cáceres*

### ABSTRACT

*The current energy inefficiency situation in buildings suggests the creation of a methodology that addresses the implementation of a smart control system using social inmotics. This article describes a methodology that incrementally allows for the continuous model optimization; and it transforms the building and its users' habits through an iterative process. In each iteration the experts propose a series of strategies on the building, that will be evaluated in the next cycle through indicators defined in advance. The results have been obtained through successive approximations and the different phases practical validation in various scenarios until reaching the version which is being implemented at the School of Technology of the University of Extremadura, in Cáceres. Experimenting with this methodology shows that social inmotics allows finding solutions that increase energy consumption and comfort.*

*Keywords: methodology; smart building; energy consumption; energy efficiency; comfort; monitoring; sensorization; social inmotics; information system.*



## 1. Introducción

Los edificios consumen más de un tercio del total de la energía primaria mundial (1). Uno de los agravantes es el desconocimiento de sus variables de funcionamiento, utilización y consumo, así como la falta de automatización de sus sistemas. A través del uso de las tecnologías de monitorización es posible desarrollar y aplicar medidas de mejora que ayuden a reducir estos consumos energéticos (2), (3), sin comprometer en ningún caso el confort de sus usuarios (4), (5), (6). En la actualidad existen algunas investigaciones en las que se han definido cuales deben ser los datos mínimos para la mejora del rendimiento de los edificios (7). Existen otras experiencias mediante las cuales se han implementado diferentes estrategias según el uso: en oficinas (8), en edificios docentes (9), (10) (estableciendo el concepto de Smart Campus), así como en otros edificios no residenciales (11), o residenciales públicos (12), (13). Se recomienda que los sistemas de información que soportan las redes de monitorización sean de código abierto (14) (para su fácil escalabilidad), reproducibles y de bajo coste (15). Por otro lado, es imprescindible un diseño adecuado del sistema de sensores transmitiendo en tiempo real (16), para la toma a tiempo de decisiones, así como de la monitorización que involucre al usuario en los conceptos de la energía consumida, las mejoras en el confort higrotérmico o en la calidad del aire interior (17).

Por todo lo descrito anteriormente, existe la necesidad de definir un método de trabajo que, de forma sistematizada, permita la adaptación de los edificios convencionales a las tecnologías de telecomunicaciones y al internet de las cosas (IoT) optimizando los consumos energéticos y mejorando las condiciones interiores. Así, el objetivo de esta comunicación es exponer una metodología de desarrollo tecnológico para la transformación progresiva de los edificios públicos convencionales en edificios inteligentes, mediante la utilización de un sistema inmótico. Con ello, se pretende dotar a los edificios de la capacidad de mejorar incrementalmente su comportamiento respecto a unos indicadores definidos a priori y que se miden como parte del desarrollo del método. Esta comunicación recoge el avance realizado durante varios proyectos de investigación: por

un lado, el proyecto SmartPoliTech, que dotó al edificio de una infraestructura de monitorización y de un primer sistema de información; posteriormente, en el proyecto EFIPUBLIC, se ha desarrollado dicho sistema incluyendo la participación de los usuarios; y actualmente en el proyecto INNOINVEST, se está desarrollando el prototipo para el sistema de control.

## 2. Metodología

La metodología que se propone está organizada en un esquema de recorrido iterativo que va transformando el edificio y los hábitos de sus usuarios, con el fin de optimizar una serie de indicadores definidos a priori. Estos indicadores se calculan de forma periódica, muestran la eficacia del método y permiten la optimización incremental del edificio. En cada iteración los expertos proponen una serie de estrategias sobre el edificio que serán evaluadas a través de los indicadores en el siguiente ciclo. En su versión final, el modelo ya ajustado del edificio se podrá conectar a simuladores específicos para evaluar situaciones y configuraciones diferentes. Del análisis de estas variantes se obtendrán de forma automática recomendaciones óptimas que se podrán integrar en el ciclo de la metodología. La propuesta que se presenta en este artículo se ha desarrollado a través de sucesivas aproximaciones y de la validación práctica de las distintas fases en diferentes escenarios (18). En cada uno de ellos se han puesto en funcionamiento variantes de la metodología, mejorando cada fase hasta llegar a la versión que está siendo implementada en la EPCC y que será desarrollada en el apartado de resultados.

De este modo la metodología consta de cinco fases. La primera es la caracterización del edificio con los datos relativos al modelo físico y de sus ocupantes. Este trabajo permite obtener, en la segunda fase, una evaluación previa del mismo con el objetivo de identificar los posibles problemas y carencias del mismo. En tercer lugar, a partir del informe generado anteriormente se diseña un sistema de información mediante el cual se gestionan los datos que capta la red de sensores existente y que después se monitorizan. En la cuarta fase, a través de la incorporación de los datos estáti-

cos y dinámicos al análisis, se establecen propuestas de mejora y se definen los indicadores. Por último, se establece un sistema de control y actuación que contiene, por un lado, avisos, alarmas, actuadores, campañas o mensajes, y, por otro lado, la programación de indicadores que cuando, el sistema comienza a iterar, se comparan entre sí, corrigiendo las estrategias diseñadas anteriormente (Figura 1)

### 2.1. Caracterización del modelo

En primer lugar, se caracteriza el edificio con los datos existentes relativos al modelo físico del mismo, así como de su ocupación, identificando las siguientes cuestiones:

- a) **Clima y ubicación:** define las condiciones geográficas y climáticas, como latitud, orografía, unidad paisajística, altura sobre el nivel del mar, orientación geográfica o sombras que afecten al edificio; así como las variables del clima como temperatura, humedad relativa, radiación solar o pluviometría.
- b) **Envolvente:** caracteriza tipológica y constructivamente el edificio a través de datos de volumetría, superficie útil y construida, año de construcción, elementos constructivos, características de los

huecos y sus carpinterías, infiltraciones de aire, puentes térmicos, especificación de zonas habitables/ no habitables, exteriores/ interiores o calefaccionadas o no.

- c) **Sistemas y servicios:** lleva a cabo el registro de todos los sistemas que son utilizados en el edificio: climatización, iluminación, abastecimiento o equipos. Además, se recogen los consumos energéticos a través de las facturas, a partir de las cuales se podrán obtener los valores medios de consumo.
- d) **Diseño interior:** define la configuración del espacio: número de plantas, estancias, superficie y alturas entre otros.
- e) **Ocupación:** informa sobre el número de ocupantes, distribución y horarios de los espacios ocupados, así como densidad de ocupación por zonas.
- f) **Uso y mantenimiento:** realiza un seguimiento del uso y mantenimiento tanto predictivo, como preventivo, o correctivo, que tenga el edificio, así como referencias a incidencias y patologías detectadas, reformas y obras posteriores a la construcción, o plan de actuaciones si existiera.

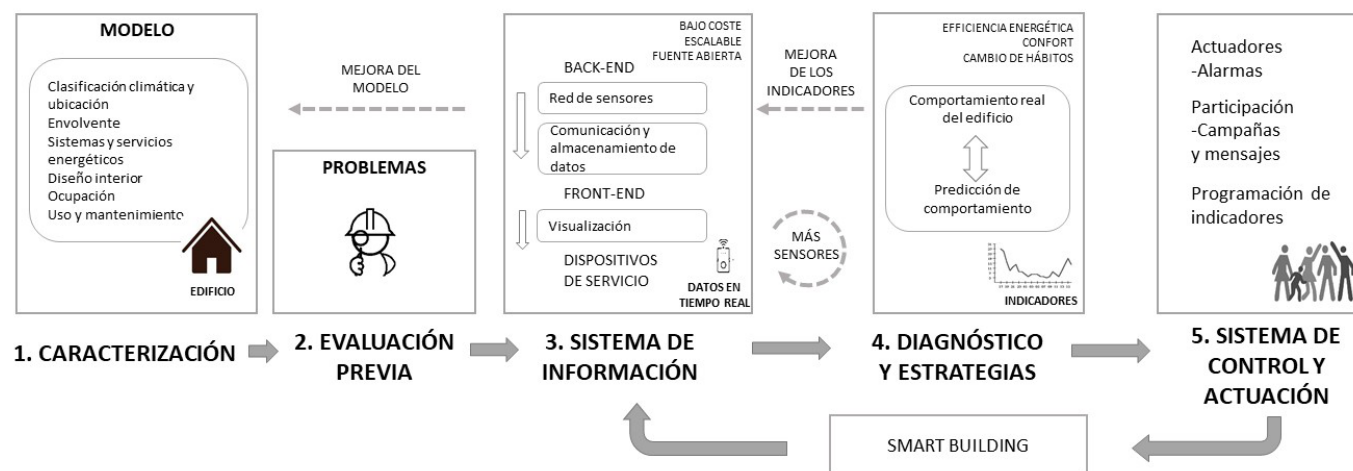


Figura 1. Diagrama de flujo de la metodología propuesta.

## 2.2. Evaluación previa

Tras la caracterización del edificio es posible realizar una evaluación previa del mismo para identificar sus posibles problemas, y que se puedan establecer así las necesidades para el diseño posterior del sistema de información (SI).

## 2.3. Diseño del sistema de información

a) **Red de sensores:** los sensores deben situarse en lugares estratégicos ubicados según la definición del edificio para caracterizar de forma representativa cada planta, orientación y zona. Hay que tener en cuenta su medio de conexión al SI, se requiere por lo tanto un estudio de viabilidad de conexiones a red y del mantenimiento necesario. Se deben elegir dispositivos de calidad suficiente y conectividad abierta, preferiblemente de fuentes abiertas, para facilitar la conexión al SI y su posterior ampliación, si fuera necesario. Las opciones de transferencia de los datos son, por publicación desde los dispositivos al servidor usando protocolos estándar como REST o MQTT, o por consulta periódica al dispositivo o a un lugar intermedio de almacenamiento, desde el servidor. Este último caso se da cuando se utiliza la red LoRaWAN, por ejemplo, y los paquetes se recuperan desde sus servidores. Este requisito de funcionamiento abierto hace inviable la utilización de muchos de los sensores de bajo coste existentes, ya que no permiten su re-configuración y solo envían los datos a sistemas propietarios. La disponibilidad de datos de consumo en tiempo real permite sustituir los valores de facturas por los obtenidos a través de los sensores; y así realizar un análisis más pormenorizado de los consumos, en intervalos de lectura más cortos (días, horas...) y delimitando las zonas en las que se producen.

b) **Almacenamiento de datos:** junto a las series temporales generadas por los sensores, el SI debe mantener datos estáticos (obtenidos en la primera fase de esta metodología) y quasi-estáticos del edificio organizados de tal manera que representen con suficiente fidelidad la entidad físi-

ca de origen. La organización de esta información mixta es muy importante para facilitar su acceso, visualización y la creación de modelos predictivos más complejos. Esta metodología sugiere utilizar 2 bases de datos, una orientada a grafos, para representar la estructura espacial del edificio, y otra de series temporales para el almacenamiento de datos dinámicos. Ambas interconectadas a través del código que se integra en el SI. También es muy aconsejable que sean de fuentes abiertas para garantizar la calidad y seguridad del código. En general, los SI se pueden organizar en dos elementos principales dependiendo de dónde se ejecuten los programas: el back-end, que incluye los elementos que se ejecutan en los servidores, y el front-end, que incluye los que se ejecutan en navegadores y dispositivos móviles y suelen tener la función de interactuar con el usuario. Una propuesta genérica y fácil de desplegar en esta fase es partir de una o varias máquinas virtuales que pueden estar sobre infraestructura propia o alquiladas en la nube. Sobre una de ellas se instalan las bases de datos y sobre la otra un software conocido como bus de servicios que expone al exterior todos los servicios del SI y conecta internamente y de forma segura con las bases de datos y otros programas encargados de la lógica interna de funcionamiento.

c) **Visualización:** el último elemento de la estructura básica del SI de esta metodología está formado por el sistemas de visualización, que utiliza herramientas para que los usuarios puedan acceder a los datos presentados de diferentes formas. Los usuarios pueden ser gestores y técnicos, personal de limpieza y mantenimiento y usuarios en general. Es importante que estas herramientas sean también abiertas para permitir su conexión, y reemplazarlas si fuese necesario.

## 2.4. Diagnóstico y definición de estrategias

En esta parte de la metodología se analizan los datos procedentes tanto de la caracterización estática del edificio como de la dinámica, obtenida mediante el SI, y se realiza un diagnóstico. Así, el estado del edificio queda totalmente definido y es posible proponer estrategias,

que pueden estar orientadas a disminuir la demanda energética directa (en instalaciones o equipos) o indirectamente (envolvente, uso y distribución, acciones como ventilación, sombreado, etc.), mejorar el confort o a informar, concienciar y modificar el comportamiento de los usuarios. En este análisis pueden utilizarse programas de simulación energética con datos de funcionamiento real, así como trabajos de predicción.

Para establecer unas estrategias adecuadas se deben definir indicadores que midan diferentes parámetros con la finalidad de optimizar el sistema y cumplir los objetivos perseguidos. Deben adaptarse a la estrategia marcada en cada uso.

### 2.5. Diseño del sistema de control y actuación

A continuación, se establecen los protocolos y normas de actuación y control, que deben fijarse con la finalidad de poner en práctica las estrategias establecidas en la fase anterior. Su implementación se lleva a cabo mediante alertas o avisos, campañas y mensajes de persuasión, información y participación o procesos automatizados. Finalmente deben ser validadas mediante el uso de indicadores que reflejen las mejoras producidas en el sistema en cada iteración.

## 3. Resultados y discusión

Se obtienen los resultados específicos del edificio caso de estudio, EPCC, para la metodología propuesta.

### 3.1. Caracterización del modelo

- a) **Clima y ubicación:** EPCC pertenece a la zona climática Csa, según clasificación Köppen-Geiger, y C4, según CTE, y está situada a 367 m de altitud, en un área relativamente llana de la zona baja de la ciudad de Cáceres. No está afectada por ninguna sombra externa y el entorno cercano está pavimentado o asfaltado. Dispone de una estación climática muy cercana lo que permite obtener datos fiables.
- b) **Envolvente:** la mayor parte de los edificios de la EPCC fueron construidos en 1989, aunque en 1999 y en 2009 se construyeron dos edificios más; por lo que actualmente está formada por 5 pabellones de

uso docente (3 de ellos con orientación E-O, uno N-S y otro con todas las orientaciones), 1 edificio dedicado a la investigación (N-S) y un laboratorio de acústica (Figura 2). Todos aislados entre sí y se reparten en 19141 m<sup>2</sup> útiles, en 1, 2 o 3 plantas. La envolvente de las construcciones de 1989 son de 1 pie de ladrillo, aislamiento EPS de 5 cm y tabique interior de 7 cm, forjados de hormigón y cubierta plana no transitable con aislamiento; las carpinterías son de aluminio sin rotura de puente térmico; muchos de los edificios presentan grandes lucernarios de policarbonato sin sombreado ni aislamiento. Se han realizado ensayos con cámara térmica (Figura 3) y blower door, con los que se han detectado puentes térmicos e infiltraciones; en el ensayo de transmitancia los resultados avalan el funcionamiento del aislamiento tanto en verticales como en cubierta.



Figura 2. Levantamiento arquitectónico en BIM de la EPCC.

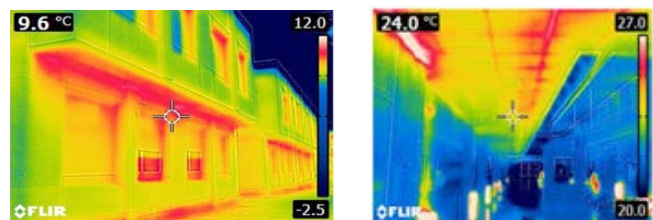


Figura 3. Ensayos exterior e interior con cámara térmica, en EPCC.

c) **Sistemas y servicios:** se han evaluado los sistemas e instalaciones del edificio, su uso y mantenimiento y el histórico de facturas de electricidad, gas y agua de los últimos años; además estos valores se han repercutido a la superficie del edificio y al número de usuarios teóricos, obteniendo así unos indicadores de consumo energético (Tabla 1).

Tabla 1. Indicadores de consumo procedentes de facturas.

		Mín.	Máx.	Med.
Consumo eléctrico	por unidad de superficie, media mensual por curso (kWh/m <sup>2</sup> )	2,54	3,36	3,02
	por densidad de ocupación, media mensual por curso (kWh/(m <sup>2</sup> /p))	3710	6786	5227
	por persona por curso (kWh/p)	316,1	374,4	354,7
Consumo de gas natural	por unidad de superficie, media mensual por curso (kWh/m <sup>2</sup> )	10,71	19,05	15,20
	por densidad de ocupación, media mensual por curso (kWh/(m <sup>2</sup> /p))	10677	14917	13035
		292,1	554,0	436,1

El consumo eléctrico total ha ido en descenso desde el curso 2015-16, con parecida tendencia que el descenso de ocupación; el consumo mensual por densidad de ocupación ha sufrido una reducción progresiva que sucede en todos los meses. Los valores más bajos se presentan en agosto (época de cierre de las instalaciones) con un mínimo de 2444 kWh/(m<sup>2</sup>/p) en 2019, mientras que los más altos se dan en los meses más fríos, con un máximo de 8700 kWh/(m<sup>2</sup>/p) en noviembre 2014. En los periodos de vacaciones de invierno existe un alto consumo por el uso individual de calefactores eléctricos. El gas natural presenta una tendencia de consumo creciente hasta el último año, con un registro máximo de 3,67 kWh/m<sup>3</sup>; sin existir relación clara entre el gasto y la severidad de las temperaturas invernales o el estado de confort. En el análisis del consumo de agua anual no se observa ninguna tendencia clara, aparte de la reducción del consumo en periodos vacacionales o de exámenes. (Figura 4).

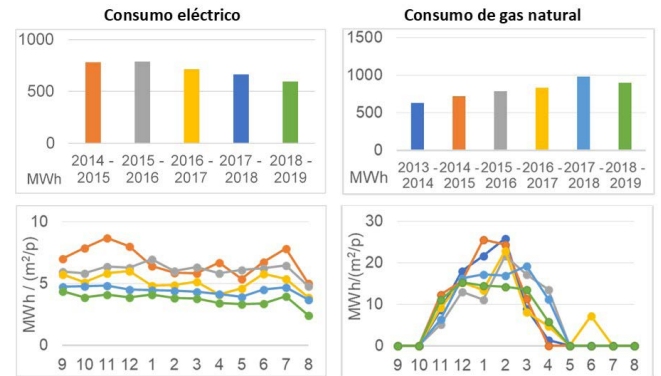


Figura 4. Análisis de los datos procedentes de facturas por cursos académicos, consumo eléctrico y de gas natural.

- d) **Diseño interior:** el espacio se configura principalmente por aulas, laboratorios, despachos, almacenes, baños y grandes espacios comunes. 5 de los edificios presentan espacios en doble altura lo que provoca la estratificación del aire.
- e) **Ocupación:** el edificio de propiedad pública lo ocupan, por un lado, estudiantes, en mayor número, y, por otro, el personal docente, investigador y de administración y servicios. Inicialmente se ha estudiado la ocupación de forma teórica, incluyendo el número de alumnos matriculados, con un total de unas 1500 personas en el curso 2018-19. El horario de ocupación es de 8 a.m. a 10 p.m. de lunes a viernes, y los espacios se ocupan de forma muy diversa según los horarios docentes, existiendo espacios a veces vacíos y otros permanentemente llenos. Ocasionalmente se utiliza alguno de los edificios en fin de semana para oposiciones o eventos. Además, se han realizado varias encuestas tanto para diagnosticar el perfil de usuario como para conocer la implicación personal de los mismos y su situación personal de confort.
- f) **Uso y mantenimiento:** los edificios no han sido reformados desde su construcción, y sólo se ha realizado mantenimiento correctivo para solucionar las incidencias más importantes.

### 3.2. Evaluación previa







Tras la caracterización del edificio se detectan las siguientes cuestiones, que servirán de guía para el diseño del SI:

- Zona climática con mayor severidad en verano, alta irradiación solar indirecta, ausencia de sombras para captación y protección solar.
- Construcción antigua y sin reformas o mejoras posteriores, orientación no adecuada en 3 de los edificios, con grandes pérdidas y ganancias térmicas debido a las infiltraciones por las carpinterías, capialzados de persianas y lucernarios de uso de gas natural para climatización indiscriminado, sin relación con las condiciones exteriores. No existe una preinstalación para disposición de sensores.
- Horario de uso muy amplio, gran movilidad y número de ocupantes, no existen hábitos correctos de uso.

Tras estas cuestiones se establecen las siguientes necesidades en el diseño del sistema de información:

- Situar sensores higrotérmicos en las diferentes orientaciones que ayuden a establecer las estrategias necesarias para ayudar a la captación/protección solar, así como a la ventilación de los espacios.
- Situar analizadores de redes para detectar altos consumos eléctricos y equipos encendidos fuera de su horario.
- Controlar automáticamente la climatización, siendo conveniente su sectorización para adaptarla a la ocupación.
- Controlar el número real de ocupantes y su ubicación.
- Instalación inalámbrica, tanto eléctrica como de datos.
- Diseñar un sistema de visualización abierto a los usuarios para permitir su participación y modificación de hábitos, y facilitar la toma de decisiones por parte de gestores.

Tabla 2. Dispositivos de la red de sensorización para la caracterización dinámica de la EPCC.

Marca/ modelo	N.º de unidades	Comunicación	Alimentación	Parámetro	Precisión	Imagen
RAY STH	23	WiFi (lecturas cada 30 min)	2 pilas LR14	Temperatura y humedad	+/- 0,5 °C +/- 3% RH	
RAY STC	4	WiFi (lecturas cada 30 min)		+ CO <sub>2</sub>	+/- 3% ppm	
EcoWin (propio)	29		Batería recargable de litio 18650	Temperatura y humedad Carpintería abierta	+/- 0,5 °C +/- 3% RH On/Off	
Circutor CVM-B150	31	ModBus Rs-485 con pasarela ModBus/TPC	85...265 Vc.a./ 120...300 Vc.c.	Analizador de red trifásico de panel con transformadores de intensidad	En tensión, corriente clase 0,2 En energías clase 0,5S	
Circutor Wibebee		WiFi	M/T: 85...265 Vc.a. 3P: 95...440 (Directo del PIA)	Consumo eléctrico	Tensión 1% Corriente 1%	
B-Meters GMDM-I IWM-PL3	15	Por pulsos	Sin alimentación	Consumo de agua	10 l/pulso	
Itrón	2	Por pulsos	Sin alimentación	Consumo de gas	0,1 m³/pulso	
EcoCounter (propio)	1	WiFi	5 Vcc. / 230 Vc.a.	Contador de impulsos mediante Arduino Yun	1 pulso	
Circutor LM25-M		ModBus Rs-485 con pasarela ModBus/TPC	85...265 Vc.a./ 120...300 Vc.c.	Centralizador de impulsos ModBus	1 pulso	

### 3.3. Diseño del sistema de información

A continuación, se describen los aspectos de monitorización y comunicaciones, almacenamiento y visualización.

**a) Red de sensores:** la red de sensores instalada en la EPCC tiene más de 150 dispositivos que mide los parámetros que definen la eficiencia energética, la ocupación, el confort térmico y los consumos: temperatura ambiental y humedad relativa, concentración de CO<sub>2</sub>, consumo eléctrico, de agua y de gas, presencia de personas, estado (encendido/apagado) de los equipos, aportación de energías renovables, temperatura de radiadores y de impulsión y retorno del agua de calderas. En su mayoría son de bajo coste (19), algunos fabricados en la EPCC, e inalámbricos sobre WiFi, con batería, dado que no existe preinstalación inmótica; la infraestructura WiFi ha tenido que ser ampliada con más de quince puntos de acceso nuevos. El rango de precisión en la toma de datos también ha sido un factor importante (Tabla 2). Los datos obtenidos desde finales de 2016 hasta el día de hoy se adquieren a través de un único bus de servicios empresarial (ESB), Zato ESB.

La ubicación de los sensores se ha establecido considerando la representatividad de los datos que se puedan obtener, construyendo así una red densa que capta datos de todo el conjunto de la EPCC. De este modo, se sitúan teniendo en cuenta la orientación de las salas (por la diferencia de radiación solar) o la altura de planta (por la estratificación del aire). También se han distribuido según el uso de cada zona, ya que determina diferente actividad, metabolismo y ocupación. El análisis previo de estos factores ha determinado la situación definitiva de los sensores.

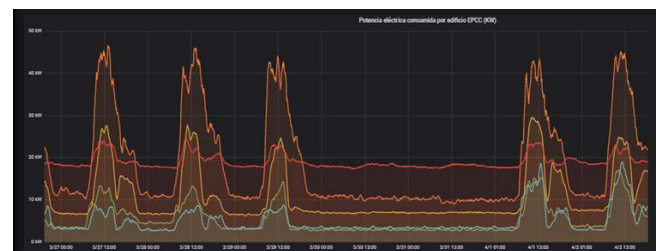
**b) Almacenamiento de datos:** los datos que se integran en el SI se han dividido en estáticos y datos dinámicos. Entre ambos se busca una representación suficiente de este entorno físico. Por un lado, los datos estáticos obtenidos en la fase 1 representan la geometría y distribución espacial de los edificios y sus espacios interiores. Las series temporales de datos de sensores se almacenan en

una base de datos específica, InfluxDB (20), que ofrece un alto rendimiento de lectura, escritura y compresión para este tipo de datos.

**c) Visualización:** es el último elemento del SI. Se ha utilizado la plataforma de fuentes abiertas Grafana (21), que puede conectarse a multitud de bases de datos y generar en tiempo real paneles de visualización configurables por el usuario, visibles de forma pública a través del siguiente enlace (<http://smartpolitech.unex.es:4000/?orgId=1>). Los datos pueden ser visualizados en gráficas de barras y evolución temporal en línea (Figura 5) con periodos de tiempo variables, que van de los últimos 5 minutos a los últimos 5 años, aunque también es posible establecer un periodo específico de tiempo. Dentro de la plataforma se han diseñado distintos paneles o tableros que van pasando a modo de carrusel y son visibles en las pantallas repartidas por la EPCC.



Consumo de agua



Consumo eléctrico

Figura 5. Tableros de visualización de datos de consumo de agua, eléctrico y concentración de CO<sub>2</sub> en Grafana.

### 3.4. Diagnóstico y definición de estrategias

A partir de los datos obtenidos del SI se ha realizado un diagnóstico, se han propuesto estrategias y se han obtenido indicadores del sistema que caracterizan el comportamiento y permiten la comprobación del cumplimiento de los objetivos:

**a) Análisis de los datos:** con los datos higrotérmicos horarios es posible estimar las zonas confortables y no del edificio; así se ha podido observar cómo en muchos momentos y espacios no se alcanza la temperatura de confort, ni en tiempo frío, con el uso de sistemas de calefacción, ni en tiempo caluroso, cuando se observa un gran desconfort por sobrecalentamiento ya que no hay ningún sistema de refrigeración, ni hábitos de sombreamiento o ventilación. En general, hay una gran oscilación entre el día y la noche y una gran caída de temperatura los fines de semana (Figura 6).

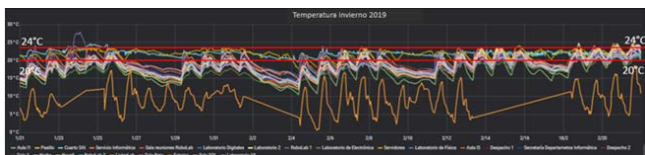


Figura 6. Evolución de la temperatura de monitorización en invierno de uno de los pabellones. Y límites UNE - EN 1521:2008.

Por otro lado, con los datos de consumos energéticos en tiempo real por unidades de tiempo y de espacio más pequeños, es posible conocer otros parámetros de consumo que permitan tomar decisiones más específicas (ej en Figura 7):

- No se controla la necesidad de iluminación artificial frente a la natural.
- Hay una alta base de consumo eléctrico concretamente en dos de los edificios.
- Los meses con más consumo eléctrico son enero, febrero, marzo, abril y julio.
- Las horas de mayor consumo tanto eléctrico como de agua son las horas centrales del día, de 8 a.m. a 6 p.m.
- Los datos de consumo de agua están muy repartidos, sin seguir ningún patrón y siendo agosto el mes de menor consumo, pero han permitido la obtención de indicadores (Tabla 3).

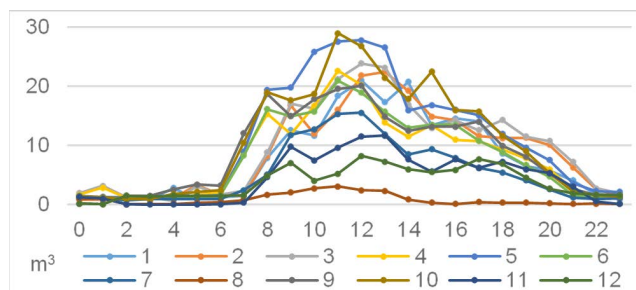
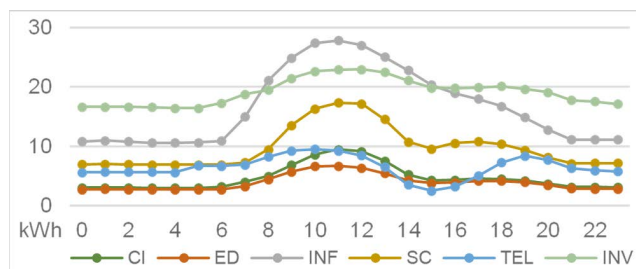


Figura 7. Análisis de los datos procedentes de monitorización por horas, consumo eléctrico por edificios y consumo de agua por mes.

Tabla 3. Indicadores de consumo procedentes de sensorización.

		Mín.	Máx.	Med.
Consumo de agua	por persona por día, media mensual por curso (L/p)	1,97	2,21	2,07
	por persona por meses, media mensual por curso (L/p)	59,12	66,34	62,18
	por persona por curso (L/p)	709	796	746

- b) Estrategias:** se recogen solamente las propuestas que pueden ser resueltas a través del sistema de control y actuación, dejando a un lado otras mejoras mediante intervenciones y reformas:
- Instalar progresivamente persianas, toldos o lamas motorizadas.
  - Domotizar la apertura y cierre de ventanas.
  - Instalar ventanas abatibles motorizadas en los lucernarios de los pabellones para ventilación.
  - Extraer el aire caliente de los pabellones con extractores forzados o sistema automático de aperturas.
  - Ventilar el forjado de saneamiento sustituyendo las falsas rejillas por un sistema efectivo.



- Sombrear la superficie de cubierta mediante toldos.
- Individualizar el consumo eléctrico según servicios y espacios para mejorar su control y entendimiento.
- Controlar la alta base de consumo eléctrico, que se mantiene durante cualquier época del año y momento del día, sin tener relación con la ocupación.
- Mejorar las consignas de encendido y apagado de las calderas en función de las condiciones operativas interiores y ambientales exteriores.
- Adecuar el consumo de las calderas al confort de las estancias.

### c) Indicadores del sistema:

- Número de horas en disconfort.
- Porcentaje de personas que participan en las campañas, RRSS...
- Uso de los recursos, y ocupación.
- Número de datos o sensores.
- Número de actuaciones realizadas o pendientes.
- Número de consultas y respuestas del sistema.
- Porcentaje de reducción de consumo energético e hídrico respecto a la situación anterior.
- Valores medios de consumo por curso, unidad de superficie, persona, densidad de ocupación, etc. a partir de datos de facturas y del sistema de monitorización.

## 3.5. Diseño del sistema de actuación y control

a) **Alertas:** dentro del sistema de información se ha implantado un protocolo de actuación mediante alertas en la plataforma Grafana. Estas detectan cuando el consumo de agua en alguno de los edificios es superior a los valores normales durante un periodo de tiempo y envía un aviso por correo electrónico y Telegram a los conserjes de la EPCC para que actúen. Así se consigue prevenir o minimizar el derroche de agua, ya que se mejoran los tiempos de respuesta ante averías y fallos en el sistema de abastecimiento, que anteriormente podían durar varios días sin ser detectadas.

b) **Campañas y mensajes:** a los usuarios y al público en general se les ofrecen pantallas con información sencilla y visual, basadas en técnicas de sensibilización y persuasión para impulsar la participación y el cambio de hábitos. Así, en el caso del consumo de agua se ha optado por ruedas que utilizan una escala de color rojo/verde para mostrar de forma clara y visual el consumo de hoy respecto al del día ayer, de este modo se pretende lograr un cambio de hábitos; además se presenta el valor total de consumo que corresponde a cada uno de los usuarios para conseguir un compromiso de acciones que se pueden llevar a cabo de forma individual. En el caso de la temperatura y humedad se usan imágenes de cada planta de los edificios con los datos medidos en tiempo real sobre el espacio en el que se encuentra el sensor, añadiendo también las condiciones higrotérmicas exteriores. La concentración de CO<sub>2</sub>, al igual que el consumo eléctrico, también se presenta con ruedas de escala de color rojo/verde que indican si la calidad del aire es aceptable o no, a la vez que se aconseja ventilar por encima de las 800 ppm. (Figura 8). Además de la actuación de los conserjes se pretende que los usuarios participen en el funcionamiento eficiente de los edificios, siendo impulsados a través de mensajes de persuasión adecuados a los perfiles de usuarios. Estos se exponen en pantallas repartidas por la zonas comunes de la EPCC y muestran en tiempo real información sobre consumos, calidad del aire y datos higrotérmicos. Además, se han llevado a cabo una serie de campañas para el ahorro de agua y energía y la mejora de las condiciones higrotérmicas interiores a través de mensajes publicados en las pantallas, las RRSS y cartelería (Figura 8).

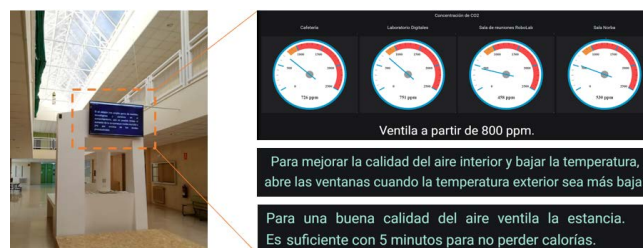


Figura 8. Tableros de visualización de datos de consumo de agua y confort en Grafana y estrategias de mejora.

- c) **Programación de indicadores:** tras haber sido definidos los diferentes indicadores del sistema en la fase anterior, estos deben ser programados para comparar con los obtenidos anteriormente, con la finalidad de medir las mejoras y validar las estrategias. Esta parte de la metodología no ha sido todavía desarrollada en la EPCC.

## 4. Conclusiones

La experiencia obtenida en la aplicación de esta metodología supone un avance hacia el desarrollo de la monitorización como parte de los edificios inteligentes. La utilización de indicadores del sistema permite medir y validar la implementación de las estrategias o medidas de mejora. Se ha demostrado que a través de la correcta interacción del edificio con sus usuarios y mediante el uso de inmótica social en tiempo real, es posible encontrar soluciones que contribuyan a una mejora en el uso de los recursos. Esta metodología, que se encuentra en continua evolución, puede utilizarse en cualquier edificio con una inversión de bajo coste, que permite optimizar cuestiones como el uso de recursos, los consumos energéticos y mejorar el confort de sus usuarios, además de fomentar la participación de los mismos.

## Reconocimientos

Esta comunicación ha sido posible por la participación del equipo en varios proyectos de investigación. El proyecto SMARTPOLITECH (Sistema inteligente de eficiencia energética para la Escuela Politécnica), pertenece a la convocatoria de Infraestructuras del Ministerio de Economía y Competitividad (2013-2016). El proyecto EFIPUBLIC (Inmótica social para el uso eficiente de edificios públicos), pertenece a la Convocatoria de Proyectos de Investigación en Centros Públicos de I+D+i financiados por la Consejería de Economía e Infraestructuras de la Junta de Extremadura y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional de la UE (2017-2020). El proyecto INNOINVEST (Promoción de inversión empresarial en innovación de productos energéticos para edificación) pertenece al Programa operativo EP-INTERREG V A España Portugal (POCTEP) (2019- 2021).

## Bibliografía

- (1) Europea C. Eurostat [Internet]. 2020 [cited 2020 Feb 3]. Available from: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/energy>
- (2) Sun K, Hong T. A framework for quantifying the impact of occupant behavior on energy savings of energy conservation measures. *Energy Build*. 2017;
- (3) Ahmad MW, Mourshed M, Mundow D, Sisinni M, Rezgui Y. Building energy metering and environmental monitoring – A state-of-the-art review and directions for future research. *Energy Build* [Internet]. 2016 May 15 [cited 2020 Feb 7];120:85–102. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778816302158>
- (4) Langevin J, Gurian PL, Wen J. Tracking the human-building interaction: A longitudinal field study of occupant behavior in air-conditioned offices. *J Environ Psychol* [Internet]. 2015 Jun 1 [cited 2020 Feb 7];42:94–115. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0272494415000225>
- (5) Park JY, Ouf MM, Gunay B, Peng Y, O'Brien W, Kjærsgaard MB, et al. A critical review of field implementations of occupant-centric building controls. *Build Environ* [Internet]. 2019 Nov 1 [cited 2020 Jan 13];165:106351. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036013231930561X>
- (6) Hong T, Yan D, D'Oca S, Chen C. Ten questions concerning occupant behavior in buildings: The big picture. *Build Environ* [Internet]. 2017 Mar 1 [cited 2020 Feb 10];114:518–30. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132316304851>
- (7) Xiao F, Fan C. Data mining in building automation system for improving building operational performance. *Energy Build* [Internet]. 2014 Jun 1 [cited 2020 Feb 7];75:109–18. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778814001169>
- (8) Bamodu O, Xia L, Tang L. An indoor environment monitoring system using low-cost sensor network. *Energy Procedia* [Internet]. 2017 Dec 1 [cited 2020 Jan 9];141:660–6. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187661021735498X>
- (9) Fortes S, Santoyo-Ramón J, Palacios D, Baena E, Mora-García R, Medina M, et al. The Campus as a Smart City: University of Málaga Environmental, Learning, and Research Approaches. *Sensors* [Internet]. 2019 Mar 18 [cited 2020 Jan 10];19(6):1349. Available from: <https://www.mdpi.com/1424-8220/19/6/1349>
- (10) Allab Y, Pellegrino M, Guo X, Nefzaoui E, Kindinis A. Energy and comfort assessment in educational building: Case study in a French university campus. *Energy Build*. 2017;
- (11) D'Agostino D, Cuniberti B, Bertoldi P. Energy consumption and efficiency technology measures in European non-residential buildings. *Energy Build* [Internet]. 2017 Oct 15 [cited 2020 Jan 9];153:72–86. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037877881730676X>
- (12) European Commission. Monitoring and control of energy consumption in municipal public buildings over the Internet (ENERINTOWN Project) [Internet]. 2008 [cited 2020 Jan 12]. Available from: <https://ec.europa.eu/energy/intelligent/projects/en/projects/enerintown>
- (13) Burgas L, Melendez J, Colomer J, Massana J, Pous C. Multivariate statistical monitoring of buildings. Case study: Energy monitoring of a social housing building. *Energy Build* [Internet]. 2015 Sep [cited 2015 Jul 23];103:338–51. Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778815301109>
- (14) Priyanka Jain AG. Review of IoT Market and Open Source Technologies in IoT. *Int J Eng Res Comput Sci Eng*. 2018;5(2):0–5.
- (15) Ciuffoletti A. Low-Cost IoT: A Holistic Approach. *J Sens Actuator Networks*. 2018;7(2):19.
- (16) Vellei M, Natarajan S, Biri B, Padget J, Walker I. The effect of real-time context-aware feedback on occupants' heating behaviour and thermal adaptation. *Energy Build* [Internet]. 2016 Jul 1

[cited 2020 Feb 7];123:179–91. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778816301992>

- (17) Sharmin T, Gül M, Li X, Ganev V, Nikolaidis I, Al-Hussein M. Monitoring building energy consumption, thermal performance, and indoor air quality in a cold climate region. *Sustain Cities Soc* [Internet]. 2014 Oct 1 [cited 2020 Jan 8];13:57–68. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670714000456>
- (18) Montalbán Pozas B, Amigo Gamero I, Domínguez Sánchez A, Bustos García De Castro P. A methodology to improve energy efficiency and comfort conditions with low-cost ICTs in rural public buildings. *Sustain Cities Soc* [Internet]. 2020;102156. Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670720301438>
- (19) Ray Ingenieria Electronica. Wireless STHR sensors [Internet]. 2015 [cited 2020 Jan 2]. Available from: <http://www.ray-ie.com/>
- (20) InfluxData. InfluxDB [Internet]. [cited 2019 Dec 29]. Available from: <https://docs.influxdata.com/influxdb/v1.7/>
- (21) Grafana Labs. The leading open source software for time series analytics [Internet]. 2020 [cited 2019 Dec 29]. Available from: <http://grafana.org>

# Sistema abierto y escalable de supervisión, gestión eficiente de la energía y control del confort del edificio CIESOL basado en IoT y Cloud Computing

Grupo ARM. UNIVERSIDAD DE ALMERIA

**J.D. Álvarez (1), M. Castilla (1), J.D Gil (1), F. Rodríguez (1) y M. Pérez (1)**

(1) Centro Mixto CIESOL, ceiA3, Universidad de Almería, Almería (España).  
CIESOL mixed centre, ceiA3, University of Almería, Almería (Spain).

Persona de contacto/Corresponding author: [jhervas@ual.es](mailto:jhervas@ual.es) (J.D. Álvarez)  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2791-8105> (J.D. Álvarez)

## Sistema abierto y escalable de supervisión, gestión eficiente de la energía y control y confort del edificio CIESOL basado en IoT y Cloud Computing

### RESUMEN

La reducción de gases de efecto invernadero es un tema de actualidad que despierta el interés tanto de la comunidad científica como de diferentes gobiernos nacionales. Para alcanzar dicha reducción en el ámbito de los edificios, ya sean residenciales o pertenecientes al sector terciario, es necesario el uso de sistemas de monitorización y supervisión donde se ejecuten controladores que permitan reducir el consumo energético del edificio mientras se mantiene unos niveles deseados de confort de los usuarios de este. En este trabajo se describe el sistema de supervisión basado en IoT y en la nube, implementado en el edificio bioclimático CIESOL utilizado para monitorizar e implementar sistemas de control que permiten mantener el confort de los usuarios de dicho edificio.

**Palabras clave:** Sistema de supervisión; confort; edificio bioclimático; sistema de control.

## *Open and scalable system for supervision, efficient energy management and comfort control of CIESOL building based on IoT and Cloud Computing*

### ABSTRACT

*Greenhouse gas emissions reduction is a current topic that arouses interest in both, the scientific community and different national governments. To achieve this reduction in the building field, whether residential or belonging to the tertiary sector, it is necessary to use supervisory control and data acquisition systems where a controller is running with the aim to reduce the building's energy consumption while users' comfort of the building is maintained in a desired level. This work describes and shows how a supervisory control and data acquisition system in a bioclimatic building, the CIESOL building, and the measurements, that are centralized in it, are used to monitor and implement control systems that maintain users' comfort in such building.*

*Keywords: SCADA; comfort; bioclimatic building; control system.*

## 1. Introducción

Actualmente, la reducción de gases de efecto invernadero a la atmósfera es un tema de actualidad que está teniendo en consideración por gobiernos de todo el mundo mediante pactos transnacionales y por el sector privado mediante acuerdos de colaboración. La emisión de dichos gases está directamente relacionada con la producción energética mediante recursos no semperpetuos, mayoritariamente combustibles fósiles. Así pues, la reducción de gases deseada se puede alcanzar mediante el ahorro energético y/o mediante un uso masivo de fuentes de energía renovable.

A la hora de hablar de reducción de consumo energético por sectores, el de edificios ya sea residenciales o de uso terciario, no se suele tener en cuenta. Sin embargo, diferentes estudios recientes cifran en un 40% del consumo energético mundial el de los edificios del primer mundo, siendo más de la mitad atribuible a sistemas de climatización (Eurostat, 2019; Moroşan et al., 2010; Pérez-Lombard et al., 2008). Por lo tanto, es deseable una reducción del consumo energético asociado al uso y construcción de los edificios y el incremento de la eficiencia energética en su acondicionamiento.

Otra consideración que debe tenerse en cuenta es que el cumplimiento del objetivo de ahorro energético no debe comprometer el bienestar de los usuarios de los edificios (Nicol & Humphreys, 2002). En las últimas décadas se está haciendo especial énfasis en la construcción de edificios basados en una arquitectura bioclimática (arquitectura orientada al ahorro de energía y al confort). Generalmente, la arquitectura bioclimática se centra en la construcción de edificios que utilizan los beneficios de la energía solar y el flujo de aire natural para producir calefacción natural y refrigeración pasiva (Dounis & Caraiscos, 2009). Mediante estas estrategias pasivas no se consiguen, en general, los niveles de confort óptimos, al menos en determinadas épocas del año, por lo que suele ser preciso complementar estas medidas con actuaciones de control específicas sobre los sistemas de climatización orientadas a proporcionar ambientes confortables desde diferentes puntos de vista (térmico, visual y de calidad de aire) con el menor consumo de energía posible (Castilla et al., 2014).

El edificio CIESOL se encuentra situado en el cam-

pus de la Universidad de Almería y se trata de un Centro Mixto de Investigación entre el CIEMAT y la Universidad de Almería, en el que trabajan grupos de investigación de ambos centros. Fue diseñado y construido como uno de los contenedores de investigación (CDdi) considerados dentro del proyecto ARFRISOL ([www.arfrisol.es](http://www.arfrisol.es)). Este proyecto Científico-Tecnológico de carácter Estratégico del Plan Nacional de I+D+I 2004-2011 fue cofinanciado con fondos FEDER, subvencionado por el Ministerio de Ciencia e Innovación (MICINN) y liderado por la Unidad de Eficiencia Energética del CIEMAT incluyendo, como participantes, además de a la Universidad de Almería y a la Universidad de Oviedo a diversas entidades privadas como: constructoras, fabricantes e instaladoras de captadores solares y módulos fotovoltaicos, fabricantes de bombas de absorción, etc. En el proyecto ARFRISOL se construyeron edificios en diferentes localizaciones del territorio nacional teniendo en cuenta dicho emplazamiento, el clima y el uso de materiales autóctonos, de manera que con un consumo nulo o mínimo de energía convencional y utilizando energías renovables, se mantuvieran constantes las condiciones requeridas de confort.

Para alcanzar los objetivos del proyecto ARFRISOL el edificio CIESOL fue equipado con una amplia red de sensores para monitorizar más de 725 señales y con un sistema de Supervisión, Control y Adquisición de Datos (SCADA del inglés Supervisory Control And Data Acquisition). Después de varios años de uso se está adaptando dicho sistema a las tecnologías actuales mediante una arquitectura en la nube del sistema de supervisión. En este trabajo se describe en profundidad tanto el edificio CIESOL como el nuevo sistema SCADA con arquitectura en la nube que se desea implementar. Además se muestran diferentes usos de las variables monitorizadas por dicho sistema para alcanzar y mantener el confort de los usuarios del mismo.

## 2. Edificio CIESOL

### 2.1. Descripción del edificio

El edificio CIESOL ([www.ciesol.es](http://www.ciesol.es)), véase Figura 1, es el *Centro de Investigación de Energía Solar* localizado en el Campus de la Universidad de Almería, en el

sureste de España. El edificio, con una superficie de 1072 m<sup>2</sup>, fue construido en base a criterios de arquitectura bioclimática.



Figura 1. Vista exterior del edificio CIESOL

Más concretamente, entre las medidas bioclimáticas pasivas aplicadas en este edificio cabe destacar (Castilla et al., 2015): i) el uso de diferentes cerramientos en función de la orientación. Por ejemplo, para las orientaciones sur y este se optó por un cerramiento de elevada inercia térmica, una fachada ventilada; ii) el retranqueo de las ventanas situadas en las fachadas sur y este para aprovechar la incidencia de la radiación solar durante los meses más fríos y evitar la misma durante los más cálidos; iii) sombreado de la cubierta del edificio mediante la instalación de un campo fotovoltaico y un campo de colectores. Finalmente, es necesario destacar que, como principal estrategia activa, el edificio dispone de un sistema de climatización basado en frío solar. Una descripción detallada se puede encontrar en la sección 2.3.

Como centro de investigación, el edificio de dos plantas se puede dividir en varias zonas a las cuales se les proporciona diferentes usos. Más concretamente, cuenta con seis despachos, todos con orientación este y localizados en la planta baja del edificio con excepción del despacho de dirección que se encuentra en la planta superior. Asimismo, el edificio posee ocho laboratorios con orientación norte: cuatro situados en la planta baja y dedicados a tareas de investigación en “Química Solar” y cuatro localizados en la planta

superior que se utilizan para tareas de “Modelado y Control Automático” y “Recursos Energéticos Solares y Climatología”. Finalmente, hay que destacar la nave-taller dónde se ubica, principalmente, la maquinaria de climatización basado en frío solar.

## 2.2. Elementos monitorizados del edificio

En esta sección se realiza un resumen de los elementos que se consideran de especial relevancia para poder analizar el comportamiento de este tipo de edificios y de posibles estrategias activas como el desarrollo de sistemas de control automático para el confort de los usuarios. Para ello, se han seleccionado cinco recintos que se encuentran monitorizados incluyendo medidas de temperatura del aire, plana radiante, de globo, humedad relativa, concentración de CO<sub>2</sub>, velocidad del aire y número de personas. Concretamente, los recintos seleccionados son dos despachos, dos laboratorios y una sala de reuniones localizada en la planta superior.

Por otro lado, también resulta de vital importancia monitorizar las condiciones climáticas exteriores ya que esto permite, por ejemplo, analizar la influencia del clima sobre las condiciones en el interior del edificio. En la cubierta del edificio se dispone de una estación meteorológica que se encarga de registrar, entre otros, temperatura del aire, velocidad y dirección del viento, humedad relativa, radiación directa, difusa y global, concentración de CO<sub>2</sub> y nivel de iluminancia.

Asimismo, una de las líneas de investigación desarrolladas en este edificio está relacionada con la gestión eficiente de recursos heterogéneos (Ramos-Teodoro et al., 2018) como agua, electricidad, gas, frío y calor industrial, etc. por lo que es necesario medir cada uno de ellos. Cómo ya se mencionó anteriormente, el edificio dispone de una planta fotovoltaica dividida en tres líneas con sus correspondientes inversores con una capacidad de producción aproximada de 9 kWp que próximamente se va a ampliar hasta los 15 kWp. Además, recientemente se ha instalado un cuadro eléctrico inteligente que permite, entre otras opciones, determinar el consumo real del edificio independientemente de la fuente que proporcione la energía (red eléctrica, campo fotovoltaico, etc.).

Finalmente, otro elemento clave del edificio que se debe monitorizar es el sistema de climatización basado en frío solar. Su monitorización permitirá conocer las de-



mandas de frío y calor industrial, así como la prueba de estrategias de control para la gestión de recursos con el principal objetivo de satisfacer las demandas del edificio con el menor coste posible. Una descripción más detallada de las variables medidas y tipo de sensores utilizados se encuentra en la sección 2.4.

### 2.3. Sistemas de actuación

Una de las medidas activas del edificio es el sistema de climatización basado en frío solar. Este sistema está compuesto principalmente por un campo de colectores solares, sistemas de almacenamiento de agua caliente y agua fría, una caldera de gas y una máquina de absorción con su torre de refrigeración, véase Figura 2. El sistema de climatización dispone de dos modos de funcionamiento: verano e invierno cuyo funcionamiento básico bajo condiciones ideales se puede resumir de la siguiente forma (Pasamontes et al., 2007): el agua circula a través del campo de colectores solares calentándose. Posteriormente, en modo invierno, esa agua caliente puede bien almacenarse en los tanques de acumulación correspondientes o inyectarse al sistema de fancoils del edificio. Sin embargo, en modo verano, es necesario inyectar al edificio agua fría. Para ello, se hace uso de la máquina de absorción la cual debe recibir como entrada agua a una temperatura preestablecida. Por ese motivo, se dispone de un sistema de apoyo, la caldera de gas, que permite garantizar esa temperatura de entrada en el caso de que las condiciones climatológicas no sean favorables. Finalmente, el agua fría proporcionada por la máquina de absorción puede inyectarse al edificio o almacenarse en los tanques de agua fría asociados.

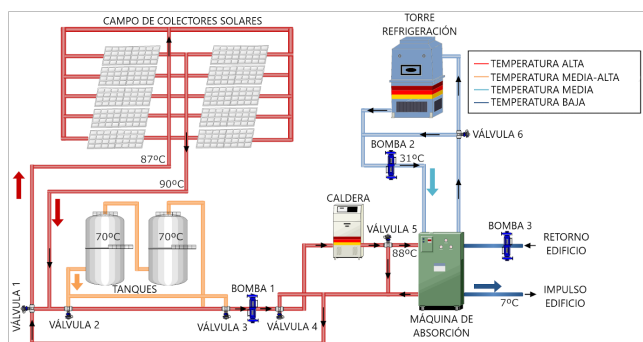


Figura 2. Sistema de climatización basado en frío solar

Por lo tanto, el sistema de climatización basado en frío solar proporciona un flujo agua caliente o fría en función de su modo de funcionamiento. Ese flujo de agua circula a través del edificio hacia los fancoils instalados en cada uno de los recintos del edificio. Además, esos fancoils permiten al usuario regular la temperatura del aire que se impulsa a cada recinto mediante dos grados de libertad, véase Figura 3. Más concretamente, es posible regular el flujo de agua que circula a través de ellos mediante una válvula y la velocidad del aire que se introduce en el recinto.

Otros actuadores que hay que destacar son la apertura/cierre de forma automática de ventanas y cortinas de dos recintos representativos, la sala de reuniones y el laboratorio de “Modelado y Control Automático” (Castilla et al., 2014). Finalmente, los dos recintos anteriores también disponen de un sistema que permite controlar, de forma remota, tanto el encendido/apagado del sistema de iluminación artificial, como regular la intensidad de estas. Para ello, sobre el sistema existente previamente se han instalado una serie de balastos electrónicos de alta frecuencia que han sido programados para aumentar la vida útil de la lámpara.

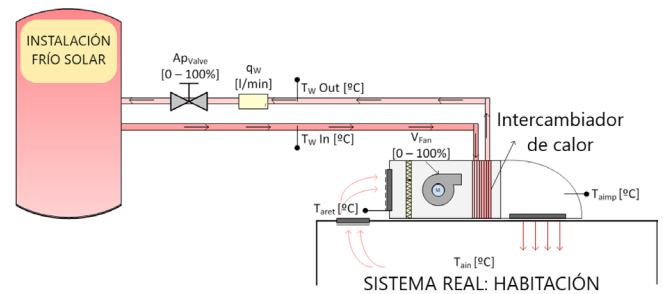


Figura 3. Esquema de un fancoil

### 2.4. Variables medidas y sistema sensorial o de medida

Todos los elementos mencionados en la sección 2.2 cuentan con una red sensorial que permite monitorizar las variables necesarias para llevar a cabo la gestión y el control del edificio. Esta red está formada por un conjunto de dispositivos de medida conectados entre sí mediante diferentes estaciones hardware y cuyas medidas se centralizan en el sistema SCADA que se describe en la sección 3. En la actualidad, se recogen

alrededor de 725 medidas (Ferre et al., 2010) las cuales se pueden dividir en diferentes subgrupos:

- 1. Variables medidas en el interior del edificio:** se dispone de termoresistencias PT100, termopares y sensores de globo para medidas de temperatura en los diferentes habitáculos del edificio. Del mismo modo, se dispone también de sensores para medir la concentración de CO<sub>2</sub> y la humedad relativa, así como de luxómetros para medir la iluminancia. Además, se monitoriza el cierre/apertura de puertas y ventanas a través de sensores de contacto.
- 2. Medida de entrada/salida de personas** en los diferentes habitáculos del edificio. Actualmente esto se mide mediante sensores fotoeléctricos instalados en las puertas. Sin embargo, estos sensores se van a sustituir por un sistema integrado de seguimiento de personas que incluye pequeños dispositivos electrónicos que sirven de transmisores y diferentes dispositivos receptores encargados de determinar su localización.
- 3. Variables medidas en la fachada ventilada** mediante piranómetros y pirogémetros para medidas de radiación global e infrarroja respectivamente. También se mide la velocidad y dirección del viento a través de dispositivos como anemómetros de hilo caliente y veletas sónicas. Por último, se dispone de una malla de sensores tipo termopares y termoresistencias PT100 para medir la temperatura del aire exterior y, además, de unos sensores de flujo térmico para medir el flujo interior y exterior de la fachada.
- 4. Variables de la estación meteorológica** que se encuentra situada en la azotea del edificio y mide variables relacionadas con las condiciones meteorológicas. Para ello cuenta con sensores de radiación directa, difusa y global, junto con sensores para medir la dirección y velocidad del viento (dispositivos similares a los mencionados en el punto anterior), barómetros para medir la presión atmosférica, sensores de humedad y sensores para medir la concentración de CO<sub>2</sub>. También cuenta con termoresistencias PT100 para medir la temperatura del aire.
- 5. Medidas de la instalación de frío solar:** en este subgrupo se encuentra la mayoría de las medidas debido al gran número de subsistemas que conforma la instalación, como, por ejemplo, calderas, máquina

de absorción, bombas, tanques de almacenamiento, etc. Esta red sensorial monitoriza variables de interés como temperatura, caudal, humedad, variables de estado de los principales elementos, etc.

- 6. Medida de consumo de agua del edificio** mediante contador con salida por pulsos que permite medir el consumo general del mismo.
- 7. Medidas de consumos eléctricos:** el cuadro general de mando, así como los diferentes subcuadros, cuentan con equipos que permiten medir los diferentes consumos eléctricos del edificio, como consumo general y por habitáculos. En concreto, dichos dispositivos monitorizan variables como tensión, energía, corriente, potencia activa y factor de potencia. Además, estos cuadros tienen instalados dispositivos que permiten monitorizar el estado de los diferentes interruptores de corte. Del mismo modo, el cuadro general de mando dispone de un analizador de redes para analizar la calidad de la energía eléctrica. Se debe destacar que las medidas de este subgrupo están en proceso de integración en el SCADA general.
- 8. Medidas de generación de energía fotovoltaica:** el campo solar fotovoltaico también dispone de una red de sensores para medir su producción. En particular, se mide el voltaje e intensidad en continua de las tres ramas generadoras, y la potencia a la salida de los tres inversores. Actualmente estos datos se recogen y almacenan de forma independiente a las variables mencionadas en el resto de los subgrupos. Sin embargo, todo quedará unificado en un único sistema SCADA cuando termine el proceso de migración e integración.

Nótese que en este apartado se hace una descripción breve y general del sistema sensorial y de las variables medidas ya que el espacio para la escritura es limitado. En el trabajo referenciado en (Castilla et al., 2014) el lector puede encontrar una descripción más detallada de las variables monitorizadas, así como información referente a modelos de sensores y marcas comerciales.

### 3. Arquitectura en la nube del sistema de supervisión

En el nuevo diseño del SCADA del edificio CIESOL, se ha optado por migrar de una arquitectura clásica centralizada en un servidor que gestiona todas las funciones y sirve de unión entre los procesos (OT, Tecnologías de la Operación) y los usuarios/datos (IT, Tecnologías de la Información), a un sistema SCADA basado en la nube y en la idea de servicios. Se trata de utilizar el paradigma IoT (Internet of Things) con las siguientes tres capas (Dastjerdi et al., 2016):

- Capa Edge (Borde). Es la capa donde se encuentran los dispositivos que toman los datos, los procesan en parte, e incluso toman decisiones. Estos sistemas pueden controlar por ejemplo un lazo de temperatura, enviando a las capas superiores la información que deba ser almacenada. Se trata de los dispositivos IoT.
- Capa Fog (Niebla). Una vez que los dispositivos envían sus datos, en la capa Fog se integran datos de diferentes fuentes, almacenándolos y procesándolos, ofertando servicios cercanos a las “cosas”. Se crea una red con latencia baja y menor carga de datos a la nube.
- Capa Cloud (Nube). Recibe la información de cada capa Fog, transformado y almacenando los datos en una red de servidores, ofreciendo una serie de servicios sobre esos datos (analítica, realización de informes, etc.) y de actuación sobre las “cosas” de la capa Edge.

Cada una de estas capas estará compuesta por unos dispositivos hardware de procesamiento y almacenamiento diferentes, que permiten ofrecer los distintos servicios de cada nivel. A este respecto se puede distinguir entre (IBM, 2020):

- Software como servicio (SaaS). Un proveedor de servicios proporciona el software y las aplicaciones a través de internet. Los usuarios se suscriben al software y acceden a él a través de la web o las APIs del proveedor.
- Plataforma como servicio (Paas). Un proveedor de servicios ofrece las herramientas necesarias para el desarrollo de un entorno basado en la nube en el cual los usuarios pueden crear y distribuir

aplicaciones. El proveedor proporciona la infraestructura subyacente.

- Infraestructura como servicio (IaaS). Un proveedor proporciona a los clientes una infraestructura para el almacenamiento, las redes, los servidores y otros recursos informáticos en la nube.

En base a estas consideraciones, se ha planteado la arquitectura del sistema SCADA que se muestra en la Figura 4, en la que se observan las tres capas de funcionamiento.

En la capa inferior (Edge) se encuentran los sistemas de medida y control de las instalaciones del edificio CIESOL que se agrupan en variables climáticas (control de confort), consumo (eléctrico, térmico y agua), producción eléctrica fotovoltaica, sistema de HVAC (calefacción, ventilación y aire acondicionado) y sistema de control del aforo en las diferentes estancias del edificio (detección de personas). Estos sistemas se pueden integrar al utilizar unas redes de comunicaciones estándar como Ethernet Industrial, Modbus o Wifi industrial. Se pueden considerar como grandes nodos IoT.

En la capa intermedia, se encuentran las fogs de cada uno de los sistemas que se han considerado en la capa inferior. En algunas de ellas ya se ofertan algunos servicios a personal de CIESOL sobre todo de informes, configuración y mantenimiento de las instalaciones.

La capa superior es una nube híbrida. Esta compuesta por una nube privada, exclusiva para usuarios autorizados de CIESOL sin conexión al exterior, en la que un servicio ETL (Extract, Transform, Load) obtiene los datos de cada Fog (extracción), los procesa para un mejor almacenamiento o filtrando posibles errores (transformación) y los almacena en sus servidores de datos (carga). Como se puede observar, la comunicación con las diferentes Fogs se realiza a través de estándares de comunicaciones industriales tipo Ethernet, o de servicio de APIs (Application Program Interface) o mediante OPC (Ole for Process Control). Por otra parte, este servicio permite comunicarse con proveedores de datos externos, principalmente vía API, como puede ser predicciones meteorológicas de la Agencia Estatal de Meteorología, que integraría en las bases o bancos de datos de la arquitectura. También se dispone de una nube pública que ofrece servicios a usuarios

autorizados externos a CIESOL que requieran datos para sus actividades I+D+i. Evidentemente, hay una diferenciación entre los servicios ofertados por tipo de usuario, incluso en el personal de CIESOL. Todos los servicios serán vía Web (https) y también se proporcionarán APIs para la creación de aplicaciones propias.

Es importante destacar que ha sido imprescindible considerar aspectos de ciberseguridad para garantizar la integridad de los datos y de las instalaciones ya que algunas de ellas son críticas, implementándose cortafuegos y otras actuaciones para que usuarios externos accedan a la nube privada de CIESOL (INCIBE-CERT, 2015). Para ello, el sistema cumple con la norma de ciberseguridad IEC62443 a nivel de componente: IEC62443-4-1 e IEC62443-4-2 (SL1) y permitirá cifrar la comunicación entre clientes y servidores usando la capa de transporte de Seguridad (TLS 1.2).

Con respecto a los servicios, debido a que se trata de un Centro de Investigación con información crítica, se ha optado por no depender de proveedores externos, por lo que se implementan los tres niveles IaaS, PaaS, SaaS, de forma que el Centro oferta todos los servicios tanto a los Grupos de investigación que lo

integran como a usuarios externos autorizados. Como servidores de datos se ha seleccionado un grupo/matriz redundante de discos independientes RAID (Redundant Array of Independent Disks), con una capacidad bruta de 60 TB, 64 GB de RAM y procesador i7 con 8 núcleos. Para ofertar los servicios software se han utilizado dos computadores con un procesador i9 de 8 núcleos, 64 GB de memoria RAM y un mínimo de 2 TB de capacidad.

Las principales ventajas de una arquitectura Cloud SCADA como la que se propone son: la flexibilidad en cuanto a incluir nuevos sistemas o “cosas” o su eliminación; sencillez y rapidez para compartir datos; personalización de servicios para cada tipo de usuario y una capacidad ilimitada de almacenamiento y recursos, por lo que se puede considerar un número ilimitado de usuarios. El hecho de que el propio centro desarrolle su propia infraestructura redundante en no poder disfrutar de otros beneficios de este paradigma como la reducción de costes en IT (ya que en servicios en la nube el mantenimiento y soporte es externo), o la reducción de los costes de las licencias ya que éstas estarían incluidas en el pago a los proveedores (Satoshi, 2016).

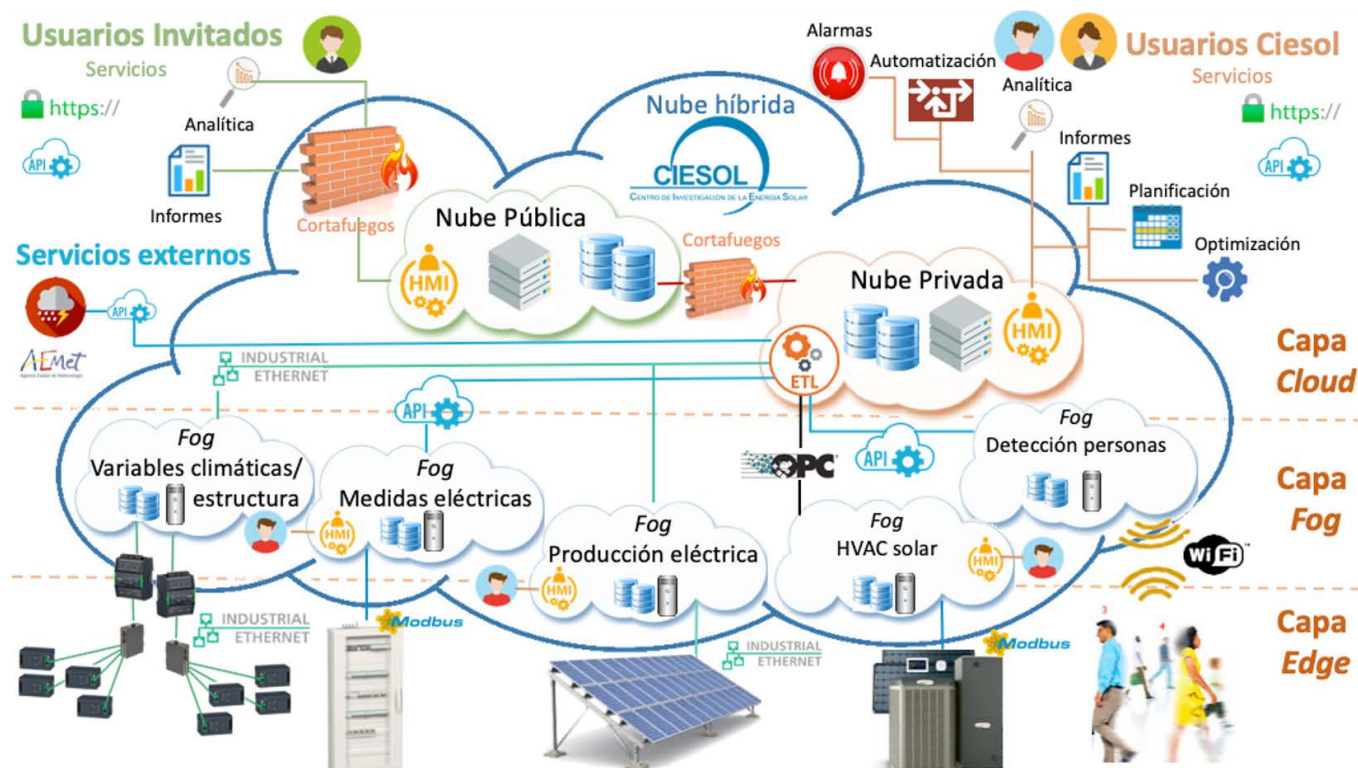


Figura 4. Arquitectura del sistema SCADA del edificio CIESOL

## 4. Resultados

### 4.1. Ejemplo de monitorización de variables climáticas

Cómo se ha mencionado anteriormente, las variables climáticas se pueden utilizar con diversos objetivos. Uno de ellos es determinar el confort de los usuarios en el interior del edificio. El confort es una sensación subjetiva que se puede cuantificar desde diversos puntos de vista como el confort térmico y la calidad de aire. Por ejemplo, para el confort térmico, uno de los índices más utilizados es el Predicted Mean Vote (PMV) que se estima en base a cuatro variables climáticas (Castilla et al., 2014): temperatura del aire, humedad relativa, temperatura radiante y velocidad del aire en el interior de la habitación. En la imagen de la Figura 5 se muestra la evolución de este índice durante quince días para el periodo de verano. Se puede observar cómo la mayor parte del tiempo el índice PMV se encuentra fuera de la zona de confort definida por los estándares ( $-0.5 \leq \text{PMV} \leq 0.5$ ) (Castilla et al., 2014) y otros en los que dicho índice es capaz de mantenerse dentro de la zona de confort. Este comportamiento viene derivado de la influencia del clima de Almería sobre el edificio y del uso del sistema de climatización por parte de los usuarios, lo cual puede verse reflejado por un aumento del consumo energético asociado a ese recinto, respectivamente.

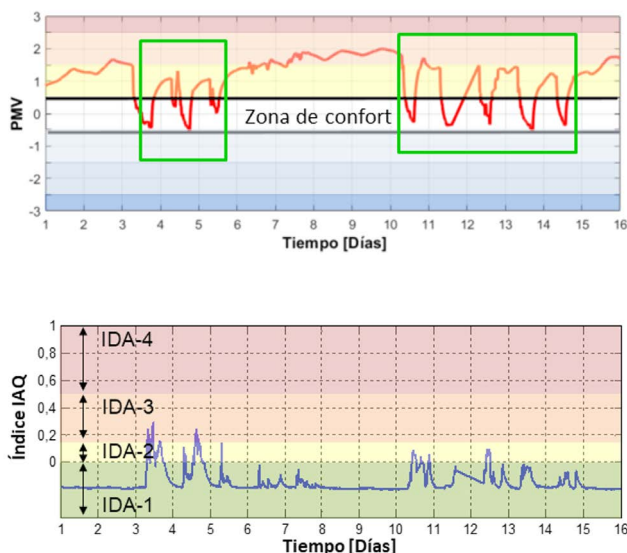


Figura 5. Uso de variables climáticas para determinar el confort de los usuarios: confort térmico y calidad de aire

Por otro lado, para determinar la calidad del aire en el interior de un recinto se suele utilizar la concentración de  $\text{CO}_2$  en el interior de este ya que la concentración de  $\text{CO}_2$  es el principal resultado de la respiración humana (Castilla et al., 2014). En la imagen inferior de la Figura 5, se muestra la evolución de la concentración de  $\text{CO}_2$  para el mismo periodo que en el caso del confort térmico. A partir de esa gráfica se puede determinar, por ejemplo, los periodos en los que la habitación se encontraba ocupada y la influencia del uso del sistema de climatización sobre la calidad de aire.

### 4.2. Uso de las variables climáticas monitorizadas

En esta sección se muestran diferentes usos de las variables monitorizadas por el SCADA del edificio CIE-SOL. La monitorización de las variables climáticas mediante una amplia red de sensores en determinados recintos del edificio permite crear modelos para predecir o simular el comportamiento de dichas variables climáticas. Por ejemplo, en la Figura 6 se muestra los resultados de un modelo basado en ecuaciones físicas para simular la temperatura interior de uno de los laboratorios del edificio. Donde la línea negra hace referencia a la temperatura real registrada por la red de sensores del edificio, la línea roja discontinua es la temperatura simulada por el modelo y la línea discontinua de color azul claro es la media cuadrática del error entre la temperatura real y la modelada que, como se puede observar, mantiene en todo momento valores muy bajo denotando la precisión del modelo a la hora de capturar la dinámica de la temperatura. Posteriormente, estos modelos se pueden utilizar para fines de simulación y predecir el comportamiento térmico del edificio ante determinadas circunstancias o para realizar sistemas de control basados en ellos. Como ejemplo, en la Figura 7 se muestran los resultados de un control predictivo basado en modelo (MPC Model Predictive Control) que una vez integrado en el SCADA permite mantener el índice PMV, línea azul de la imagen superior, en la zona de confort óptima definida por los estándares, franjas negras discontinuas, e incluso hacer que su valor valga cero la mayor parte del tiempo.

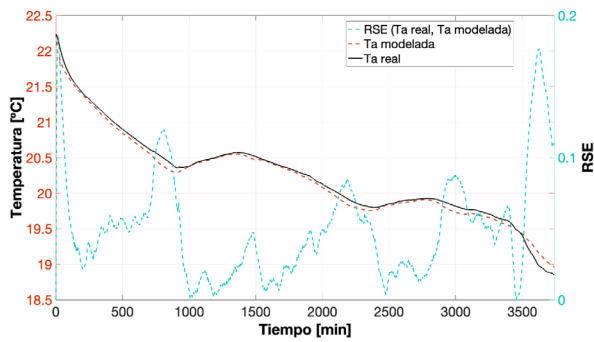


Figura 6. Modelado de la temperatura interior de un laboratorio

Para conseguir este objetivo, el controlador MPC es capaz de calcular, en base al modelo anteriormente comentado, que valor de temperatura interior debe de tener el recinto para que el índice PMV se mantenga dentro de la franja de confort térmico o tenga un valor óptimo, es decir, que valga cero. Una vez calculada dicha temperatura interior, el controlador la intentará alcanzar por medio del sistema de climatización variando la temperatura del aire que suministra este sistema al recinto, línea azul de la imagen inferior de la Figura 7.

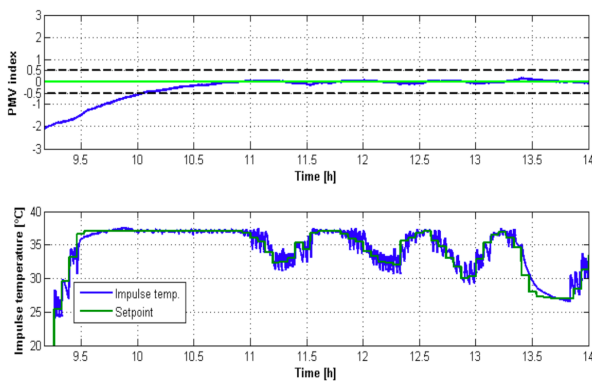


Figura 7. Resultados del controlador MPC

### 4.3. Ejemplo de monitorización de variables de frío solar, consumo de agua, consumo eléctrico, y generación fotovoltaica

En esta subsección se proporcionan algunos ejemplos de las variables monitorizadas en la instalación de frío solar, de la instalación fotovoltaica y de variables de consumo. En primer lugar, en la Figura 8 se muestra tres días típicos de operación del sistema de frío solar. Corresponden a la temporada de verano, donde el sistema se utiliza en modo refrigeración. En particular, en

la Figura se muestran las temperaturas de impulso y retorno del sistema de frío solar. La consigna de la temperatura de impulso es de 12.5 °C, y se puede observar cómo dicha temperatura se encuentra en el entorno a ese valor cuando el sistema está en marcha, aproximadamente desde las 8:00 a las 18:00 horas en cada día. Del mismo modo, se debe comentar que la temperatura de retorno es mayor debido a las cargas del edificio y pérdidas térmicas del circuito. Por último, cabe destacar que las fluctuaciones de la temperatura cuando el sistema está en operación se deben a variaciones en las demandas en las cargas del edificio.

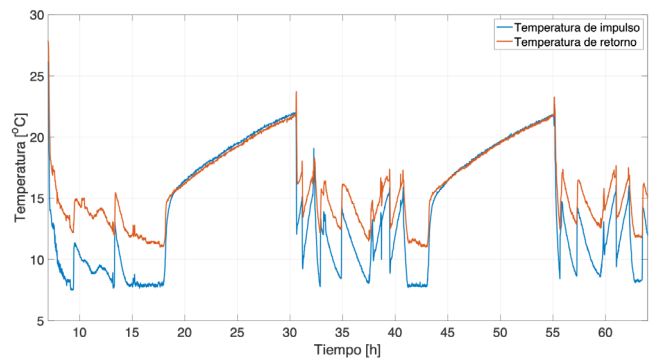


Figura 8. Temperaturas de impulso y retorno del sistema de frío solar en tres días típicos de verano

En la Figura 9 se muestra la demanda de agua del edificio durante un día típico. Nótese que en esta variable se registra el consumo general, teniendo en cuenta todos los dispositivos que demandan agua en el edificio como cuartos de baño, lavaderos y lavavajillas de los diferentes laboratorios, y demás equipamiento. El uso de estos aparatos es intermitente y no tiene una naturaleza predecible, esto explica los diferentes picos de consumo que se pueden observar.

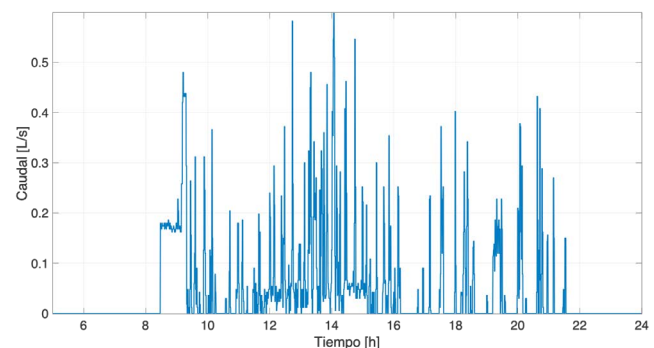


Figura 9. Demanda de agua del edificio.

La Figura 10 muestra la potencia total generada de la instalación fotovoltaica, i.e., la suma de la potencia a la salida de los tres inversores de la instalación. En este caso se muestran cuatro días de operación típicos donde se puede observar el efecto de nubes pasantes.

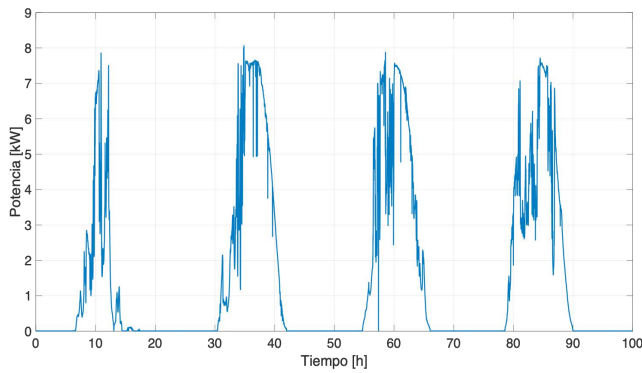


Figura 10. Potencia generado total por la instalación fotovoltaica durante cuatro días de operación típicos.

En la Figura 11 se muestra la potencia eléctrica total consumida. Como se mencionó anteriormente, las variables registradas relacionadas con los consumos eléctricos todavía no están integradas en el sistema SCADA general del edificio. De esta forma, actualmente solo se pueden consultar medidas instantáneas o en ventanas de tiempo reducidas mediante una aplicación proporcionada por el fabricante.

En la Figura 11 se muestra una captura de dicha aplicación, donde se puede observar la potencia total consumida en el edificio durante una ventana de tiempo de 5 minutos.



Figura 11. Potencia total consumida.

## 5. Conclusiones

En este trabajo se ha descrito el sistema de supervisión y de adquisición de datos de un edificio bioclimático, el edificio CIESOL, situado en el campus de la Universidad de Almería. Este sistema de supervisión se ha migrado de una arquitectura inicial clásica centralizada, con un servidor que gestiona todas las funciones y sirve de unión entre los procesos y los usuarios/datos, a un paradigma actual de supervisión basado en la nube y en la idea de servicios. Los datos que recogen se utilizan, entre otras cosas, para mantener el confort de los usuarios del edificio mediante sistemas de control que reducen, al mismo tiempo, el consumo energético del sistema de climatización consiguiendo, así, una reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero que genera el edificio.

## Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Proyecto del Plan Nacional de I+D+i DPI2017-85007-R del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades de España y fondos FEDER. Juan D. Gil ha sido financiado por una beca FPI de la Universidad de Almería.

## 6. Bibliografía

- Castilla, M., Álvarez, J. D., Rodríguez, F., & Berenguel, M. (2014). Comfort Control in Buildings. En *Advances in Industrial Control*. <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-6347-3>
- Castilla, M., J.D. Álvarez, Rodríguez, F., & Berenguel, M. (2015). Un ejemplo de arquitectura bioclimática: el edificio C-Ddl-CIESOL-ARFRISOL. En J. M. Maestre (Ed.), *Domótica para ingenieros* (pp. 231-254). Editorial Paraninfo.
- Dastjerdi, A. V., Gupta, H., Calheiros, R. N., Ghosh, S. K., & Buyya, R. (2016). Fog Computing: Principles, architectures, and applications. En *Internet of Things: Principles and Paradigms* (pp. 61-75). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805395-9.00004-6>
- Dounis, A. I., & Caraiscos, C. (2009). Advanced control systems engineering for energy and comfort management in a building environment-A review. En *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 13, Números 6-7, pp. 1246-1261). Pergamon. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.09.015>
- Eurostat. (2019). Energy consumption in households - Statistics Explained. [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy\\_consumption\\_in\\_households#Energy\\_products\\_used\\_in\\_the\\_residential\\_sector](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy_consumption_in_households#Energy_products_used_in_the_residential_sector)
- Ferre, J. A., Pasamontes, M., Castilla, M., Berenguel, M., Jiménez, M. J., Bravo, D., & Pérez, M. (2010). Desarrollo de un sistema de monitorización y control para edificios bioclimáticos en el marco del proyecto ARFRISOL. I Congreso sobre Arquitectura Bioclimática y Frío Solar (PSE-ARFRISOL).
- IBM. (2020). Modelos de servicio de cloud IaaS PaaS SaaS - España | IBM. <https://www.ibm.com/es-es/cloud/learn/iaas-paas-saas>
- INCIBE-CERT. (2015). Arquitecturas de seguridad en la nube para la industria | INCIBE-CERT. <https://www.incibe-cert.es/blog/arquitecturas-seguridad-nube-industria>
- Moroşan, P. D., Bourdais, R., Dumur, D., & Buisson, J. (2010). Building temperature regulation using a distributed model predictive control. *Energy and Buildings*, 42(9), 1445-1452. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.03.014>
- Nicol, J. F., & Humphreys, M. A. (2002). Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings. *Energy and Buildings*, 34(6), 563-572. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00006-3](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00006-3)
- Pasamontes, M., Guzmán, J. L., Rodríguez, F., Berenguel, M., & Camacho, E. F. (2007). Modelo híbrido de una planta de frío solar. Congreso Internacional de Aislamiento Térmico y Acústico-CIATEA.
- Pérez-Lombard, L., Ortiz, J., & Pout, C. (2008). A review on buildings energy consumption information. *Energy and Buildings*, 40(3), 394-398. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.03.007>
- Ramos-Teodoro, J., Rodríguez, F., Berenguel, M., & Torres, J. L. (2018). Heterogeneous resource management in energy hubs with self-consumption: Contributions and application example. *Applied Energy*, 229, 537-550. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.08.007>
- Satoshi. (2016). Cloud Scada: Un análisis de su funcionamiento - Opiron Electronics. <https://www.opiron.com/2016/12/27/cloud-scada/>



# La monitorización de la calidad del aire interior como herramienta de evaluación y mejora de la salubridad de un espacio

InBiot Monitoring S.L.

**M. Figols (1), X. Aláez (2)**

(1) Arquitecta Técnica e Ingeniera de Edificación. Project Manager inBiot Monitoring S.L., Noáin (Navarra)

(2) Ingeniero Industrial. CEO y CTO inBiot Monitoring S.L. Noáin (Navarra)

Persona de contacto/Corresponding author: [mfigols@inbiot.es](mailto:mfigols@inbiot.es) (M. Figols)

## La Monitorización de la Calidad del Aire Interior como herramienta de evaluación y mejora de la salubridad de un espacio

### RESUMEN

La calidad del aire interior es un factor fundamental en el ámbito de la salud en espacios interiores. De hecho, respiramos más de 15.000 litros de aire al día, entre un 80 y 90% de las veces en el interior de los edificios según la OMS. Por otra parte, la tendencia constructiva en el ámbito de la eficiencia energética incide en el aumento de la estanqueidad que, sin una adecuada renovación de aire basada en las condiciones de uso y no en perfiles prefijados, puede derivar en una mayor concentración de contaminantes interiores. La monitorización continua de la calidad del aire se presenta como la herramienta básica que permite evaluar los datos en el tiempo para una evaluación de las pautas de uso, del perfil de ocupación, el tipo y grado de contaminación (de fondo, puntual), su periodicidad y el potencial de mejora de un espacio.

**Palabras clave:** Calidad Aire Interior; ventilación; monitorización; salubridad; edificios.

## *Indoor Air Quality Monitoring as an evaluation and improvement tool for healthier indoor spaces*

### ABSTRACT

*Indoor air quality is a fundamental factor in promoting healthy indoors. In fact, we breathe more than 15,000 liters of air a day, between 80 and 90% of the time inside buildings, according to the WHO. On the other hand, constructive trends in the field of energy efficiency promotes the increase of airtightness. And, without adequate air renewal based on the conditions of use and not on predetermined ventilation profiles, it can lead to a higher concentration of indoor pollutants. Continuous indoor air quality monitoring is presented as the basic tool that allows the evaluation of data over time for analyzing usage patterns, occupancy profile, type and degree of pollution (background, isolated), its periodicity and the potential for improvement of a space.*

**Keywords:** *Indoor Air Quality; ventilation; monitoring; health standards, buildings.*

## 1. Introducción

La calidad de los espacios que habitamos y su aire interior son, sin duda, factores clave para nuestra salud [1], [2], [3], [4]. Múltiples campañas, como la denominada BREATH LIFE de la OMS, señalan que una de las problemáticas más acentuadas de la sociedad actual urbanita es la calidad del aire que se respira.

Pasamos entre el 80 al 90% de nuestro tiempo en el interior de espacios cerrados, de acuerdo con la OMS, donde la calidad del aire es, según la EPA (Environmental Protection Agency de los EEUU), del orden de 2 a 5 veces peor que en el exterior. Esto principalmente se debe a que a los contaminantes exteriores se le añaden los interiores, produciendo una notable disminución de una calidad del aire que ya es deficitaria en el exterior. Sus efectos sobre la salud van desde una simple sensación de somnolencia, cefaleas, irritaciones nasales y/o oculares, pudiendo derivar en procesos alérgicos e hipersensibilidades. También puede reforzar su efecto sinérgico con otras enfermedades ambientales y que afectan a la productividad de las personas es su entorno de trabajo, a su capacidad de desempeño y creatividad y, por lo tanto, también a su confort y bienestar.

El confort térmico, en general, juega un papel importante en la forma en que experimentamos los espacios donde vivimos, aprendemos y trabajamos, y también tiene implicaciones directas en la productividad y la salud de sus usuarios. Un estudio [5] encontró que el aumento de la temperatura de la oficina en solo 1 ° C disminuyó la productividad en un 15%, mientras que otros [6] sugieren que pequeñas diferencias de temperatura de pocos °C pueden influir en la velocidad y precisión de los trabajadores hasta en un 20%.

Tanto la directiva europea EPBD – Energy Performance of Buildings Directive, como su transposición a las normativas nacionales con el concepto de “edificio de consumo de energía casi nulo (ECCN), así como otros certificados de eficiencia energética tipo Passivhaus, exigen un aumento de la estanqueidad de los edificios, de forma que la renovación de aire queda exclusivamente en manos de la ventilación y su regulación. El uso de materiales de construcción que limiten las emisiones de contaminantes al aire interior debería ser el punto de partida; y la renovación de aire, siempre necesaria,

basada en las condiciones de uso. No obstante, tanto la manera de ventilar, como la regulación y medición de los sistemas actuales de ventilación, no es la adecuada, principalmente debido a los siguientes motivos:

- La tendencia constructiva hacia la alta eficiencia energética conlleva una mayor hermeticidad en los edificios para minimizar las pérdidas energéticas y optimizar la regulación del sistema de climatización/ventilación, cobrando por lo tanto una mayor importancia tanto las bajas emisiones al aire interior de acabados y mobiliario, como la adecuada regulación del sistema de ventilación para garantizar su eliminación.
- El confort termohigrométrico ( $T^a$  y HR) e incluso la concentración de  $CO_2$ , no son suficientes para definir la biohabitabilidad de un espacio. Es necesario tener en cuenta otros posibles contaminantes que condicionan la calidad del aire interior (IAQ).
- La renovación de aire en espacios de trabajo y centros educativos, donde estudiantes, profesorado y trabajadores desempeñan labores que requieren concentración, se basa generalmente en renovaciones puntuales, incumpliendo los requisitos de renovación de aire de RITE.
- La medición de calidad del aire interior, vinculada generalmente al trabajo de los servicios de prevención, se lleva a cabo conforme a la normativa de prevención de riesgos laborales y en base a normas vinculadas como la UNE 171330, sin embargo, se trata de mediciones puntuales que no permiten plantear medidas de mejora adaptadas a los patrones de uso del edificio. Esto redundaría en una regulación inadecuada de la calidad del aire y un control ineficiente de los sistemas de ventilación.

Es por lo tanto necesario el seguimiento continuo de la evolución de la calidad del aire interior, que permita analizar patrones de comportamiento y así conocer la pauta de uso, el perfil de ocupación, el grado y fuente de contaminación, así como el potencial de mejora de un espacio en materia de calidad del aire interior. La evaluación del comportamiento del edificio es muy variable en función del uso (hábitos de climatización y ventilación, productos de higiene y limpieza, materiales de construcción, acabado y equipamiento, etc) y sólo el estudio de la evolución en el tiempo garantiza esta información.

## 2. Desarrollo y metodología

La metodología propuesta se basa en una solución completa y personalizada de monitorización y mejora de la calidad del aire interior (Indoor Air Quality, en adelante IAQ) en edificios, mediante la medición de parámetros del aire para mejorar la habitabilidad interior. Este sistema de medición se basa en la utilización de un dispositivo de monitorización continua (MICA - Medidor Inteligente de la Calidad del Aire), capaz de medir y monitorizar la evolución de la temperatura, la humedad relativa, el CO<sub>2</sub>, la concentración de formaldehidos y de los compuestos orgánicos volátiles totales, recogiendo los datos de manera inalámbrica en una plataforma IoT propia en la nube, con información personalizada, representación gráfica de la evolución y propuesta de actuaciones de mejora en base a los perfiles de uso, los rangos de contaminación o al sistema de regulación existente, gracias a los algoritmos de inteligencia artificial que analizan los patrones de comportamiento detectados.

La metodología empleada se basa en 3 pilares innovadores respecto de otras soluciones detectadas en el sector de la medición de la calidad del aire interior:

- **AMPLIACIÓN DEL CONCEPTO IAQ:** al margen de la medición de temperatura y humedad relativa, se incorporan otros parámetros que determinan la biohabitabilidad del lugar seleccionado como el CO<sub>2</sub>, el formaldehído, o los compuestos orgánicos volátiles. Igualmente la tecnología empleada permite incorporar otros sensores como las partículas en suspensión (PM2.5/PM10), el ozono, el monóxido de carbono o el radón.
- **MONITORIZACIÓN CONTINUA:** la evaluación continua en el tiempo del IAQ permite establecer pautas de mejora, a partir de un perfil de uso continuo en el tiempo, que facilita el análisis del tipo de contaminación detectadas, o de la causa de valores monitorizados fuera de rango.
- **PLATAFORMA IoT Y ANÁLISIS DE DATOS:** la gestión en tiempo real de la información monitorizada se realiza a través de plataforma en la nube My inBiot, complemento de MICA y desarrollada por inBiot Monitoring S.L. Esta plataforma ofrece información clara y accesible, evolución de los parámetros monitorizados, información personalizada

sobre cada sensor y pautas de actuación, gracias a su tecnología de análisis y visualización de datos.

### 2.1. Definición de parámetros

Los parámetros que determinan la calidad de un ambiente interior se clasifican según su naturaleza en físicos (como la temperatura, las radiaciones, el ruido...), químicos (como sustancias y/o compuestos orgánicos e inorgánicos presentes en el aire y/o el polvo en suspensión) o biológicos (mohos, esporas, bacterias o ácaros). La evaluación de la calidad del aire interior implica el análisis de los niveles de contaminación química y biológica, condicionados por la temperatura y la humedad.

A partir de la última actualización del DB HS3 del CTE, la concentración de CO<sub>2</sub> es tomada en cuenta como indicador de un aire interior adecuado – como tal, el CO<sub>2</sub> no es un contaminante, sin embargo, en altas concentraciones es tóxico por desplazamiento de oxígeno, además de que altos niveles continuados (>800 ppm) condicionan el confort, la capacidad de concentración, bienestar y productividad en espacios interiores. Su monitorización es clave como indicador de que el sistema de renovación de aire funciona adecuadamente.

Los compuestos químicos presentes en el aire interior se clasifican en:

- **MUY VOLÁTILES (COMV):** como el formaldehído, el ozono, el cloro, el monóxido de carbono (CO), el dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) y otros gases de combustión
- **VOLÁTILES – compuestos orgánicos volátiles (COVs):** disolventes como aldehídos, alifáticos, alcoholes, compuestos aromáticos, glicoles, cetonas, terpenos, etc, partículas en suspensión y fibras
- **SEMI VOLÁTILES (COSV):** compuestos orgánicos poco volátiles y persistentes como biocidas, fungicidas, pesticidas o retardantes de la llama, así como metales pesados. Estos componentes pueden ser detectados suspendidos en el aire, pero mayoritariamente en el polvo, tanto en suspensión como sobre superficies de los espacios interiores.

El radón es otro gran contaminante de origen natural. Es un gas radiactivo que acumulado en espacios interiores aumenta significativamente el riesgo de cáncer de pulmón para sus ocupantes, por lo que vigilar su presen-

cia en espacios interiores, es prioritario. De hecho, es “casi” obligatorio (en el momento de publicar este artículo el RD732/2019 está en fase de aplicación voluntaria) a partir de la última actualización de CTE y su nuevo documento DB HS6 Protección frente al radón.

Controlar la calidad del aire, requiere por lo tanto mantener a raya todos estos contaminantes que pueden desprenderse de materiales de construcción, acabado, equipamiento, o del propio uso y mantenimiento de un espacio en forma de productos de higiene y limpieza.

## 2.2. Métodos de medición y monitorización

La medición de la calidad del aire interior ha seguido tradicionalmente un protocolo estandarizado para su evaluación a través de la medición directa y/o la utilización de técnicas de laboratorio como detectores de ionización de llama o cromatografía de gases-espectrometría de masas, que proporcionan una forma precisa de identificar gases específicos dentro de una muestra de aire.

Sin embargo, en mediciones donde la variación diaria es significativa, como puede ocurrir en espacios interiores, tanto de uso docente, sanitario, turístico o residencial en función de las condiciones de uso, hábitos de climatización y renovación de aire, entre otros, resulta aún más significativo evaluar la evolución en el tiempo de la calidad del aire. Una película aporta más información que un solo fotograma.

La monitorización continua de los datos durante un tiempo determinado (preferiblemente varias semanas), permite evaluar de una manera más fiable las pautas de uso, el perfil de ocupación, el tipo y grado de contaminación (de fondo, puntual), su periodicidad y el potencial de mejora de un espacio. Las estrategias de mejora se determinarán en función de los valores monitorizados y los riesgos detectados en cada caso. Si el confort termo-higrométrico es inadecuado será necesaria la revisión y ajuste del sistema de climatización, su control, regulación, la necesidad de humidificación o deshumidificación, pudiendo incluso calcular la cantidad de vapor de agua que un espacio necesita aportar o eliminar para unas condiciones de confort determinadas y elegir el dispositivo o sistema específico para este uso. La monitorización de la concentración de CO<sub>2</sub> permite evaluar la eficacia del sistema de ventilación y

programar su regulación en función de su concentración. La evolución y pautas detectadas en relación con el resto de los parámetros que determinan la contaminación química, permiten la prescripción de purificadores de aire con filtros de alta eficiencia y adsorbentes para la reducción de contaminantes gaseosos (formaldehído, COVs...), la implementación de sistemas de fitorremediación, aplicación de radiación ultravioleta o cualquier otra estrategia enfocada a la reducción de las fuentes de contaminación.

El dispositivo empleado – MICA – realiza lecturas de la calidad del aire de forma periódica, con el intervalo configurado por el usuario en función del tipo de espacio, el sistema de ventilación y el objetivo de la monitorización y que puede ser desde 1 minuto de rango de datos. Un botón táctil permite hacer una lectura instantánea, activando una luz que se enciende a modo de semáforo para informar del estado general de la calidad del aire.

## 2.3. Aparatos de medición

Los dispositivos de monitorización continua como el MICA de inBiot permiten hacer un seguimiento continuado de los distintos parámetros que definen la calidad del aire interior.

La sensórica empleada en el desarrollo de este tipo de dispositivos es la base para la captación de datos. La arquitectura IoT permite transformar los datos en información útil, gracias a un microprocesador incorporado y una plataforma en la nube.

Un dispositivo abarca una superficie aproximada de 50 m<sup>2</sup>, aunque en función del tipo de uso y del objeto del estudio, puede ser necesario un dimensionamiento específico. Los sensores utilizados son especialmente sensibles a los compuestos volátiles y por la propia naturaleza del sensor de formaldehído (electroquímico), y del sensor de TVOC (MOX), se pueden presentar reacciones cruzadas con compuestos con alto contenido en alcohol, muy presente en productos de uso cotidiano (productos de higiene y limpieza, principalmente). Se deben colocar sobre superficies alejadas de la radiación solar directa (>100 cm. de distancia de pared exterior con ventanas y >50 cm. de pared sin ventanas, según recomendaciones de la norma UNE 171330), preferiblemente en superficies o cerramientos interiores (en el caso de dispositivos de pared), evitando su

colocación junto a focos de emisión de calor o de contaminantes, bocas de impulsión o extracción de aire.

Si el objeto del análisis es la detección de compuestos químicos en el aire, resulta fundamental analizar la evolución y su comparación junto con el resto de los parámetros, que permita verificar pautas de ventilación y uso del espacio.

Cada parámetro tiene un sensor y tecnología específica, según su funcionamiento y naturaleza. Las dudas surgen en las diferencias entre la medición de contaminación química según los protocolos clásicos, respecto de la utilización de dispositivos de monitorización continua de bajo coste. En este sentido, es importante entender que la precisión de la evolución en el tiempo cobra más relevancia que la exactitud de la medida puntual para diagnosticar la calidad del aire interior. Y que la información que ofrecen unos y otros métodos de medición es diferente pero complementaria entre sí.

MICA realiza lecturas de la calidad del aire de forma periódica, con el intervalo configurado por el usuario en función del tipo de espacio, el sistema de ventilación y el objetivo de la monitorización a partir de una medición por minuto. Un botón táctil permite hacer una lectura instantánea, activando una luz que se enciende a modo de semáforo para informar del estado general de la calidad del aire.

Estos dispositivos tienen protocolos de comunicación abiertos, siendo posible su interoperabilidad con otros sistemas desde el propio dispositivo o su plataforma de datos, a través de una API.

Los algoritmos de gestión de la plataforma de datos permiten detectar pautas de comportamiento y funcionamiento del sistema de renovación de aire a través del análisis de la evolución de los parámetros monitorizados. La pendiente de subida y bajada en los valores altos detectados permite evaluar el tipo de contaminación, la repetición en el tiempo o los valores de fondo.

La plataforma en la nube My inBiot permite visualizar los datos registrados mediante opciones configurables (el formato se adapta a cualquier tipo de pantalla, Tablet o Smartphone), de modo que, en función de los valores obtenidos, se establece un prediagnóstico y se ofrecen una serie de consejos para mejorar la calidad del aire. Mediante esta metodología de mejora continua, se per-

mite hacer un seguimiento de la calidad del aire ininterrumpido, validando o rechazando las acciones que nos llevan a disfrutar de una óptima calidad del aire.

La evolución de este tipo de dispositivos de monitorización permite incluir nuevos sensores y parámetros para medir la biohabitabilidad [7], así como proporcionar un nivel de conectividad con los dispositivos del entorno que le permita actuar sobre la regulación de la ventilación y climatización. A su vez, dota a la plataforma My inbiot de capacidad y funcionalidades para gestionar cargas masivas de datos y proporcionar informes automatizados mediante el Business Intelligence.

De esta forma, el desarrollo de una solución de monitorización de la calidad del aire, con una integralidad y comunicación universal en el campo de la medición del aire en edificios, supone una interesante novedad. Actualmente se pueden encontrar en el mercado distintos dispositivos enfocados a medir la calidad del aire interior, sin embargo, estos no son capaces de comunicarse con todos los protocolos de comunicación disponibles en los edificios, mientras que la mayoría de ellos tampoco permiten su integración con otros equipos o sistemas del mercado.

Por otra parte, el enfoque de los servicios hacia los edificios en general y hacia la Calidad del Aire interior en particular, supone un valor añadido en los sistemas de medición de IAQ. En España no existe ninguna Plataforma Internet of Things abierta para su integración con otras plataformas/dispositivos, que esté plenamente enfocada hacia la monitorización en edificios y que convierta los datos de la calidad del aire en información fácilmente interpretable por el usuario y con un enfoque de mejora continua.

#### **2.4. Valores de referencia**

Establecer unos valores de referencia es otro de los aspectos clave para el diagnóstico de la calidad del aire, ya que definir qué valores son óptimos requiere una revisión de la normativa existente y de las recomendaciones que desde la perspectiva de la salud se ofrecen en instituciones privadas y/o públicas.

No existe requerimiento legal, ni consenso legislativo sobre los valores de referencia para la salud en espacios interiores. La base legislativa es, por un lado, las recomendaciones higrotérmicas del RITE (Reglamento

de Instalaciones Térmicas) y las exigencias básicas de salubridad del CTE, sin embargo, no se especifican valores de emisiones al aire interior en el ámbito de la contaminación química. Para ello, se toman como referencia los valores límite de exposición profesional del INSST (Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo), con recomendaciones y valores límite en sus Normas Técnicas de Prevención, aunque siempre en el ámbito de la higiene industrial y laboral, y no tanto en el de la prevención de la salud en concentraciones continuas en el tiempo a bajas dosis.

La norma UNE 171330 recoge en su tabla A.2 – valores de referencia, los criterios de confort y máximos aceptables, como recomendación legislativa, basados en los VLA (Valores Límite de Exposición Ambiental) del INSST o recomendaciones de la OMS según parámetros – que sirven exclusivamente para la evaluación y el control de los riesgos por inhalación de los agentes químicos [8] siendo su base de datos RISCTOX [9] una excelente referencia para la evaluación de la peligrosidad de determinados compuestos químicos.

## 2.5. Experiencias de monitorización

La metodología propuesta se verifica en la monitorización de dos edificios de usos complementarios, que permiten la obtención de datos y comprobación del estado de la calidad del aire interior, tanto a nivel residencial, como a nivel de uso terciario (oficinas). Los edificios monitorizados se recogen a continuación:

- Edificio de oficinas: monitorización de tres espacios abiertos de 250, 335 y 335 m<sup>2</sup>, y 37, 54 y 54 personas de ocupación por planta respectivamente. Edificio de construcción y estructura convencional, sistema de climatización y renovación de aire centralizado.
- Vivienda de alta eficiencia energética: vivienda de 80 m<sup>2</sup> reformada en su totalidad, con modificación de distribución y criterios de alta eficiencia energética (passivhaus sin certificar). Test de estanqueidad n50, de 0,38 renov/hora, sistema de ventilación mecánica de doble flujo con recuperador de calor y suelo radiante como sistema de calefacción

## 3. Resultados

### 3.1. Edificio de oficinas

La monitorización de la calidad del aire en estas oficinas se realiza para plantear propuestas de mejora en la calidad del aire interior, principalmente en relación con la humedad relativa baja. Se detecta una caída progresiva en la humedad relativa interior en la monitorización continua, causa directa de discomfort, por su contribución a la irritación y sequedad de las mucosas respiratorias y oculares y una mayor proliferación de polvo en suspensión.

Las oficinas objeto del presente estudio se ubican en edificio aislado en un polígono empresarial de la Comarca de Pamplona (Navarra), distribuido en tres plantas alzadas, con ocupación del 100% por parte de la misma empresa (promotora del estudio). Sus tres plantas tanto de espacios de oficinas abiertos, como de despachos privativos cuentan con monitorización de forma continuada, con el objetivo del seguimiento y control de sus instalaciones y de las condiciones de trabajo del edificio. A partir de este trabajo de monitorización continua se ha podido verificar un desajuste en las condiciones de confort en época de invierno, motivo por el cual se realiza un estudio de mayor profundidad.

A partir de los datos monitorizados y su visualización en gráficas de semana tipo, se analizan las medias horarias y diarias y se calculan los tiempos de exposición e indicadores específicos de cada uno de los parámetros monitorizados: temperatura, humedad relativa, CO<sub>2</sub> y formaldehído.

La información revela un exceso de temperatura interior (el percentil 75 en todos los espacios monitorizados está entre 23 y 24°C, superando el rango de recomendación de RITE para el invierno de entre 21 y 23°C), así como una humedad relativa inferior al 40% el 95 % del tiempo de ocupación, con valores medios en torno al 30% de humedad relativa (HR) y mínimos cercanos al 25%.

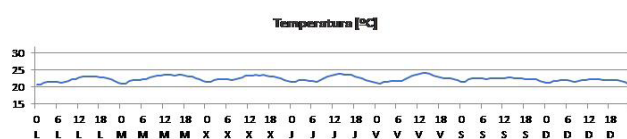


Figura 1 - Evolución de la temperatura interior - semana tipo

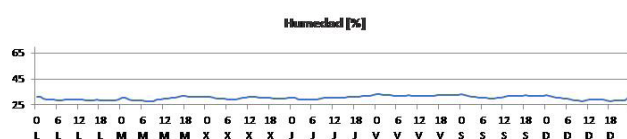


Figura 2 Evolución de la humedad relativa interior - semana tipo

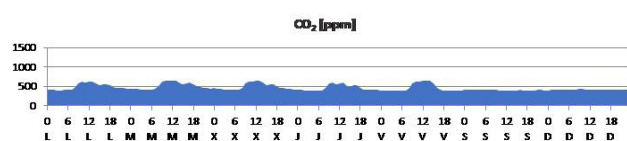


Figura 3 Evolución de la concentración de CO<sub>2</sub> - semana tipo

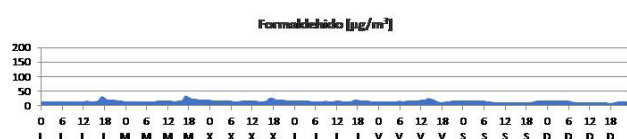


Figura 4 Evolución de la concentración de formaldehído - semana tipo

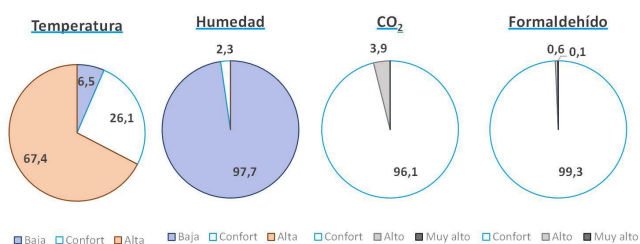


Figura 5 Tiempo de exposición (%) en valores de confort

Las estrategias empleadas para la mejora del ambiente interior en estas oficinas se basan en las siguientes actuaciones:

- Limitar la temperatura de control a 21°C. El exceso de temperatura interior contribuye a la disminución de la humedad relativa en espacios interiores por sus propias características higrotérmicas.
- Humidificación: se precisa de un dispositivo de humidificación integrado en UTA o evaporativo portátil, con control de humedad máxima.

- Fitorremediación: la fitorremediación es la utilización tecnológica de plantas vivas y microorganismos asociados para el saneamiento ambiental de suelo, agua y aire. Las plantas de interior tienen la capacidad de regular la humedad ambiental por el efecto de la evaporación, disminuyendo los efectos fisiológicos derivados de una baja humedad relativa. La evaporación es el método más importante de perder calor para una planta. Las plantas utilizan una media de aproximadamente un 5 % de la luz para la fotosíntesis. Cerca de un 60 % de la luz que llega a la planta se convierte en calor y debe evacuarse mayormente a través de la evaporación.
  - Se recomiendan plantas que resistan adecuadamente interiores con baja humedad relativa como la sansevieria trifasciata, la beaucarnea, aspidistras, clivias, phoenix, potos, crasas, o cactus, según zonas por su exposición y grado de iluminación natural disponible
- Mantenimiento: filtros HEPA y criterios de limpieza: Una humedad relativa baja implica una mayor proliferación de polvo en suspensión, por lo que es fundamental el filtro HEPA cuando se empleen aspiradores. Igualmente, se especifican criterios de limpieza para garantizar que la eliminación de polvo superficial se realiza mediante utilización de bayetas húmedas. Resulta fundamental la limpieza de filtros y rejillas de impulsión y extracción de aire, así como la reducción de superficies sintéticas en la medida de lo posible, para evitar la carga electrostática.

La tecnología utilizada en la monitorización ha permitido, a partir del cálculo de la humedad específica en los espacios monitorizados, seleccionar la actuación de mejora necesaria para mantener unas condiciones de confort higrotérmico ideales de 21°C y una humedad relativa del 50%. Estas condiciones implican la necesidad de humidificación [10] del ambiente de entre 2,06 a 2,37 l/h según espacio, y se prescribe específicamente un humidificador evaporativo portátil con capacidad evaporativa entre 1,5 y 2 l/h, y, por lo tanto, un funcionamiento puntual, cuando las condiciones interiores lo requieran.

Como valor complementario, la empresa alojada en este edificio tiene mobiliario certificado libre de formaldehído, información que se verifica gracias a la monitorización y valores continuos inferiores a 40 µg/m<sup>3</sup>.



### 3.2. Rehabilitación de vivienda de alta eficiencia

El presente case study se trata de una vivienda reformada en 2016 con criterios de alta eficiencia, situada Logroño.

La vivienda se ha reformado en su totalidad, con modificación de distribución, aislamiento interior de algodón reciclado y trasdosado con cartón yeso con acabado con pintura plástica estándar. El suelo es laminado vinílico imitación madera, colocado flotante sobre lámina antiimpacto, mortero de nivelación y aislamiento de algodón reciclado. El rodapié es de DM lacado y la carpintería de PVC, con vidrio triple.

Durante el trabajo de reforma se realizó la prueba de estanqueidad n50, con un resultado de 0,38 renov/hora. El sistema de ventilación implementado es un sistema de ventilación mecánica controlada de doble flujo con recuperador de calor, rejillas de impulsión y extracción de aire en techo y suelo radiante como sistema de calefacción

Tras varias semanas de monitorización continua, se detectan de manera continuada altos niveles de formaldehído en el interior de la vivienda, con picos que pueden alcanzar los 1.000  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  y una media diaria por encima de 150  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (cuando los valores recomendados por la OMS no deberían superar los 100  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). A pesar de disponer de un sistema de ventilación controlada continua, éste no es capaz de reducir los picos de formaldehído mientras que la ventilación manual con ventanas, sí. La concentración de  $\text{CO}_2$  se mantiene en niveles de confort el 96% del tiempo.

Como complemento a la monitorización continua durante 4 semanas de temperatura interior, humedad relativa,  $\text{CO}_2$  y formaldehído, se verifican los datos de contaminación química con ensayos de laboratorio específicos, que aporten la concentración exacta de contaminantes en el aire interior. Para ello se realizan tomas de muestras para su análisis en laboratorio que complementen la información monitorizada, mediante análisis específico de concentración de formaldehído, y screening de COVs, para la cuantificación de los tres compuestos orgánicos volátiles presentes en mayor concentración.

Tabla 1. Resultados de laboratorio

COMPUESTO		Referencia		Concentración	
		Nº CAS	PM (g/mol)	Dorm. $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Salón $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Screening COVs LAB	Acetato de etilo	141-78-6	88,11	22,01	18,23
	Ciclohexano	110-82-7	84,16	18,24	20,89
	Benceno	71-43-2	78,11	0,08	0,08
	Xileno	1330-20-7	106,16	19,09	19,65
Ensayo LAB	Formaldehído	50-00-0	30,031	18,3	89,2
Monitorización de formaldehído durante toma de muestra				101	168

En el laboratorio se detecta concentración significativa de formaldehído (89,2 y 18,3  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en salón y dormitorio respectivamente), acetato de etilo (18,23 y 22,01  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) y ciclohexano (20,89 y 18,24  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), como compuestos significativos, con una concentración superior a los 0,08  $\mu\text{g}/\text{m}^2$  – límite de detección del laboratorio empleado. Tanto en el caso del acetato de etilo, como del ciclohexano, se trata de compuestos irritantes y neurotóxicos en concentraciones dentro de valores normativos, pero por encima de valores de recomendación por su riesgo toxicológico (Guidance values - AGOEF) [11], empleadas principalmente como adhesivos.

La alta volatilidad del formaldehído en un espacio con un sistema de ventilación de doble flujo con recuperador de calor implicaría su reducción gracias funcionamiento continuo de la renovación de aire. Sin embargo, los valores monitorizados se mantienen en valores altos o muy altos más del 90% del tiempo de ocupación tanto en el dormitorio como en el salón. Además, cuando se realiza la renovación de aire a través de apertura de ventanas en fachadas opuestas, los niveles monitorizados recuperan la normalidad.

La reacción cruzada del sensor electroquímico (tecnología electroquímica) con otros compuestos implica la presencia de otros compuestos en el aire interior. En este caso, el elevado peso molecular detectado en los principales compuestos del screening de COVs – ace-

tato de etilo y ciclohexano – reflejan una reacción cruzada del sensor de formaldehído con dichos compuestos y son indicativos de un déficit en el funcionamiento del sistema de ventilación de doble flujo.

Debido al diseño de distribución de los conductos de distribución de aire y dado que las bocas de impulsión y extracción del sistema de ventilación están ubicadas en techo en direcciones contrapuestas (extracción en baño y cocina, impulsión sobre la puerta del dormitorio), y que el dispositivo de monitorización estaba colocado a una altura no superior a 40 cm., se deduce una renovación de aire únicamente del estrato superior del volumen de aire de las estancias.

En este caso, una ventilación cruzada manual con ventanas de manera puntual resulta más efectiva ya que sí que garantiza un barrido del aire de la estancia, eliminando los compuestos de mayor peso molecular, estratificados en la parte inferior del volumen de aire.

Las estrategias empleadas para la mejora del ambiente interior en esta vivienda se basan en las siguientes actuaciones:

- Altura de colocación del dispositivo de monitorización: la modificación de la altura del dispositivo de monitorización continua permite identificar la estratificación de la concentración de contaminantes interiores.
- Continuar con el sistema de ventilación manual puntual: por tratarse de una vivienda de uso permanente y mientras no se garanticen niveles seguros, la presencia de personal especialmente sensible (mujer embarazada y niña <3 años), requiere de especial precaución con una calidad del aire interior inadecuada.
- Reducción de las fuentes de emisión: sellado de cantos de tableros de contrachapado ocultos en mobiliario y materiales de acabado, así como sustitución de productos de higiene y limpieza. Sustitución en la medida de lo posible de suelos laminados (imitación madera) ante la fuerte emisión continua de formaldehído que implica su colocación.
- Equipamiento auxiliar libre de contaminantes: evitar la incorporación de alfombras plásticas o mobiliario que no tenga garantizadas sus bajas emisiones de COVs y/o formaldehído
- Fitorremediación: la utilización tecnológica de

plantas vivas y microorganismos asociados para el saneamiento ambiental de suelo, agua y aire, ayuda al filtrado de compuestos orgánicos volátiles y formaldehído continuo en bajas concentraciones. Se aprovecha la capacidad natural de algunas plantas de absorber, concentrar y metabolizar determinados compuestos químicos presentes en el ambiente interior como contaminantes, con concentraciones mínimas de entre el 5-10% de ocupación respecto a la superficie total del espacio, o a partir de 20 plantas de tamaño medio por cada 100 m<sup>2</sup> de superficie.

- Purificación del aire: los purificadores de aire son herramientas muy útiles y efectivas para el filtrado de alta eficiencia (HEPA) de partículas en suspensión, polvo o esporas, con el adecuado prefiltro de partículas de gran tamaño, filtro de polen y de polvo grueso. No obstante, para garantizar su eficacia en el filtrado de gases volátiles como COVs o formaldehído se requieren materiales de filtrado con capacidad de adsorción de gases, como puede ser el filtro de carbón activo y zeolita de al menos 6 Kg de peso y filtro HEPA
- Productos de limpieza: la concentración de sustancias volátiles en ambientes interiores requiere de una adecuada regulación de la ventilación, especialmente en viviendas de alta hermeticidad, donde la concentración de sustancias perjudiciales puede ser más significativa. Igualmente, a la toma de conciencia de reducir la presencia de contaminantes y de regular la ventilación en consecuencia, la limpieza tanto diaria, como de mantenimiento esporádico debe ser revisada de manera generalizada. Debe carecer de sustancias químicas potencialmente alérgicas que puedan estar contribuyendo a la contaminación interior, y evitar la presencia de formaldehído, insecticidas o disruptores endocrinos. Para ello se plantean las siguientes premisas básicas en la limpieza interior de los espacios:
  - Reducir el uso de fosfatos, lejía, disolventes, conservantes y desinfectantes potencialmente sensibilizantes
  - Evitar perfumes y fragancias sintéticas (los ftalatos se utilizan para fijar los perfumes sintéticos en productos de limpieza e higiene)
  - Evitar el uso de productos antibacterianos

## 4. Conclusiones

Tradicionalmente, la calidad del aire en los edificios viene determinada por el confort y la eficiencia energética. Las nuevas propuestas de las directivas europeas apuntan a la necesidad de priorizar la salud, un reto cuya relevancia ha sido subrayada por la crisis sanitaria provocada por el COVID 19.

En un contexto en el que los edificios deben ser cada vez más inteligentes, se hace necesario disponer de dispositivos fiables, capaces de evaluar la calidad del aire de forma continua, dado que, generalmente, los patrones de evolución de los parámetros aportan más información que una medición puntual de laboratorio. A partir de este análisis, un servicio profesional posterior puede prescribir pautas de actuación y mejora, o determinar la necesidad de ampliar el tipo de ensayos a realizar en un laboratorio especializado, en caso de detectarse cualquier tipo de anomalía.

La película es más relevante que la fotografía puntual, por lo que la monitorización permite obtener información que una medición puntual no garantiza. Ante esta circunstancia, se plantean las tecnologías IoT y la IA como la combinación perfecta para realizar un buen diagnóstico de la salubridad del aire, a través de la captación de datos, análisis y propuesta de soluciones, con posibilidad de regular los dispositivos involucrados.

La dificultad para la medición de los contaminantes en el aire radica en la necesidad de conocer qué compuesto o sustancia se quiere analizar, para poder elegir el método de análisis más adecuado. Sin embargo, la utilización de aparataje de alta precisión, exactitud (y coste) limita el acceso a esta información, por lo que queda relegado a servicios de prevención y no permite la mejora continua y el enfoque hacia el bienestar y la salud de trabajadores y usuarios. La monitorización continua, junto con sensores electroquímicos (formaldehído) o (MOX – metal oxide, para TVOC) permite combinar la innovación tecnológica y la salud para identificar el estado de la calidad del aire interior de nuestros edificios, cuantificarla, y, por lo tanto, valorar el margen de mejora. Para, de esta manera, plantear soluciones específicas y adaptadas a cada proyecto.

La tecnología electroquímica del sensor de formaldehído empleado reacciona a su vez con determinados

gases presentes y frecuentes en ambientes interiores, pudiendo ofrecer un valor de medición distorsionado. El sensor es especialmente sensible ante la presencia de alcoholes (etanol), por lo que su presencia en productos de higiene y limpieza implica valores elevados de formaldehído. Sin embargo, esta información siempre es indicativa de presencia de contaminantes en ambientes interiores, como paso previo a un ensayo de laboratorio y como indicador de alarma. En casos como el de la vivienda de alta eficiencia presentada, la monitorización deriva en un ensayo de laboratorio de concentración de formaldehído y screening de compuestos orgánicos volátiles, que complementa la información y que ofrece interesantes resultados sobre el propio diseño de la instalación de renovación de aire y su capacidad de renovar completamente el aire de una estancia.

La calidad del aire en otro tipo de espacios de uso terciario, como pueden ser centros educativos, viene generalmente determinada por su concentración de CO<sub>2</sub>, que al mismo tiempo representa la eficacia del sistema de renovación de aire, sea manual o mecánico. Este parámetro es determinante en el confort y desempeño de estudiantes y profesorado, por ejemplo, y dista mucho de estar garantizando niveles normativos y mucho menos, niveles que garanticen espacios saludables. Los hábitos de uso, en cuanto a equipamiento y productos de higiene y limpieza, mostrarán

Finalmente, asegurar una regulación inteligente de los edificios precisa la prevalencia de protocolos abiertos de comunicación que hagan posible la interoperabilidad de los distintos elementos que componen un edificio, siendo la calidad de aire una prioridad para garantizar la salud de sus ocupantes.

## 5. Agradecimientos

Este artículo se nutre del trabajo en desarrollo durante 2019 y 2020 de los proyectos de I+D de Gobierno de Navarra “Internet of Buildings” y “BioSmart Ventilation”, del recién estrenado programa NEOTEC 2019 del Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial, CDTI, del Ministerio de Ciencia e Innovación, y el ya concluido programa Smart Iruña Lab, del Ayuntamiento de Pamplona, desarrollado durante 2019. Agradecimiento especial a las entidades colaboradoras (Gobierno de Navarra, CDTI, Ayuntamiento de Pamplona), así como a todo el equipo de inBiot Monitoring S.L.

## 6. Referencias bibliográficas

- [1] Lévesque B, Huppé V, Dubé M, Fachehoun R.C. Impact of indoor air quality on respiratory health: results of a local survey on housing environment. *Public Health*, Volume 163, 2018, Pages 76-79, ISSN 0033-3506, <https://doi.org/10.1016/j.puhe.2018.06.015>
- [2] Wargocki P, Productivity and Health Effects of High Indoor Air Quality. Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences, Elsevier, 2019, ISBN 9780124095489, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.01993-X>
- [3] La Fleur L, Moshfegh B, Rohdin P. Measured and predicted energy use and indoor climate before and after a major renovation of an apartment building in Sweden. *Energy and Buildings*, Volume 146, 2017, Pages 98-110, ISSN 0378-7788, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.04.042>
- [4] Wolkoff P, Indoor air humidity, air quality, and health – An overview. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, Volume 221, Issue 3, 2018, Pages 376-390, ISSN 1438-4639, <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2018.01.015>
- [5] de Dear, R.J., Akimoto, T., Arens, E.A., Brager, G., Candido, C., Cheong, K.W.D., Li, B., Nishihara, N., Sekhar, S.C., Tanabe, S., Toftum, J., Zhang, H. and Zhu, Y. (2013), Progress in thermal comfort research over the last twenty years. *Indoor Air*, 23: 442-461. doi:10.1111/ina.12046
- [6] Fisk, William & J, William. (2002). How IEQ affects health, productivity. *Ashrae Journal - ASHRAE J.* 44.
- [7] Silvestre, E. Vivir sin tóxicos. Cómo ganar bienestar y salud en tu vida cotidiana. RBA Integral, Barcelona 2014
- [8] Límites de exposición profesional - <https://risctox.istas.net/index.asp?idpagina=616>
- [9] Base de datos de sustancias tóxicas y peligrosas RISCTOX, Instituto Sindical de Trabajo, Ambiente y Salud – ISTAS (CCOO) - <http://risctox.istas.net/index.asp>

- [10] G. Soreanu, 12 - Biotechnologies for improving indoor air quality, Start-Up Creation, Woodhead Publishing, 2016, Pages 301-328, ISBN 9780081005460, <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100546-0.00012-1>.
- [11] AGÖF Guidance Values for Volatile Organic Compounds in Indoor Air. Disponible en: <https://cutt.ly/wrJGdhP>



# GT4

Barrios



onitoRED

## Grupos de investigación

---

UNIDAD DE I+D SOBRE EFICIENCIA ENERGÉTICA  
EN LA EDIFICACIÓN (UIE3)  
CIEMAT

Análisis experimental de entornos urbanos realizados  
por la Unidad de I+D UIE3 del CIEMAT

ABIO  
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID (UPM)

Monitorización de la isla de calor en la ciudad de  
Madrid

SEMB  
UNIVERSIDAD DE LLEIDA

Análisis energético de los edificios de la Universidad  
de Lleida

TEP 130  
UNIVERSIDAD DE SEVILLA (US)

Monitorización para el desarrollo de modelos predictivos  
a escala urbana

SCHE-IETCC  
CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES  
CIENTÍFICAS (CSIC)

Monitorización de barrios residenciales de promoción  
pública de Madrid con edificación altamente ineficiente  
y población vulnerable. El proyecto HABITARES

## Grupos invitados

---

UNIZAR

Hacia una monitorización de barrio. Análisis de la reha-  
bilitación de viviendas sociales en Zaragoza

INTROMAC

Monitorización energética y confort en barrios de  
viviendas sociales en Extremadura



# GT4

## Barrios

Coordinación

INSTITUTO EDUARDO TORROJA DE CIENCIAS DE  
LA CONSTRUCCIÓN- CSIC

Fernando Martín-Consuegra

[martin-consuegra@ietcc.csic.es](mailto:martin-consuegra@ietcc.csic.es)

### La monitorización a la escala urbana

Se recogen aquí las experiencias de monitorización realizadas por los grupos de investigación de la red que abordan la escala urbana. Se han clasificado los trabajos en dos secciones: en primer lugar se exponen aquellos que analizan las condiciones exteriores del espacio urbano, y en segundo lugar aquellos que evalúan la eficiencia energética y habitabilidad de conjuntos de edificios.

La primera sección incluye experiencias de dos grupos que han trabajado el ámbito de la ciudad. Uno de los aspectos influyentes en el comportamiento energético de los edificios y en el confort de los espacios exteriores son las características microclimáticas del entorno próximo, abordadas por el *Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas* (CIEMAT). A continuación se incluye un resumen de estudios de la isla de calor urbana realizados por el *grupo de investigación Arquitectura Bioclimática en un entorno sostenible* de la Universidad Politécnica de Madrid (ABIO UPM). En él también se aborda la caracterización del microclima urbano, esta vez desde la óptica del sobrecalentamiento en verano.

En la segunda sección se aborda la eficiencia energética en conjuntos de edificios. Se incluye un análisis para edificios terciarios presentado por el grupo de investigación *Sustainable Energy, Machinery and Buildings* (SEMB), de *l'Escola Politècnica Superior de la Universitat de Lleida*: un método para analizar los registros de consumos de los edificios de la universidad y explorar las posibilidades de compensarlos median-

te la producción de energías renovables para lograr un campus de consumo de energía casi nulo. El segundo bloque de esta sección está centrado en conjuntos de edificios residenciales: cuatro trabajos dirigidos a la monitorización de barrios de promoción pública. Se abarcan diferentes zonas climáticas de España, analizando conjuntos situados en Sevilla, Madrid, Badajoz, Mérida y Zaragoza. El *grupo de investigación TEP130* de la Universidad de Sevilla aborda el problema de la generalización de registros realizados en unas pocas viviendas a todo el barrio, mediante modelos predictivos. En el caso de Madrid, el *grupo de investigación en Sistemas Constructivos y Habitabilidad en la Edificación* del Instituto Eduardo Torroja de ciencias de la construcción (giSCHE IETcc CSIC) pone el foco en el problema de vulnerabilidad energética que generan los edificios ineficientes en sus ocupantes, convirtiéndose en un vector de riesgo de pobreza energética. Las experiencias de Extremadura y Zaragoza tienen en común la comparación de edificios antes y después de la rehabilitación para cuantificar los resultados obtenidos mediante medidas pasivas, utilizando datos empíricos medidos y contrastados. En la propuesta de la *Universidad de Zaragoza* se evalúa la mejora de la envolvente con una solución de aislamiento térmico exterior, y el caso de Extremadura presentado por *INTROMAC* incorpora el desarrollo de sensores propios utilizando la tecnología Arduino para reducir los costes de la monitorización y incluir un gran número de casos.

A través de estos trabajos es posible identificar las temáticas que, desde la escala urbana, están generando un mayor interés en los grupos de investigación de-

dicados a la monitorización de la eficiencia energética, la calidad del aire y el confort en España. Estas son principalmente: la caracterización del entorno urbano, la incorporación de energías renovables en comunidades energéticas y la cuantificación de la mejora obtenida por la rehabilitación de conjuntos de edificios. Para esta última tarea se identifica como necesaria la realización de modelos urbanos calibrados con datos reales, de manera que podamos generalizar los resultados recogidos en unos pocos casos para la evaluación de barrios enteros. Esto permitirá el planeamiento de operaciones de regeneración urbana a gran escala, con un alto potencial de mejora de la sostenibilidad en nuestras ciudades, en base a evidencias objetivas y medidas experimentales. En ese sentido preocupa el vector de riesgo que supone la edificación ineficiente en áreas de rentas bajas, que exige unos consumos energéticos muy elevados para alcanzar los estándares de confort. La recuperación de estas áreas supone inversiones que sus ocupantes no pueden costear. Estas circunstancias dificultan que la transición a un modelo económico más sostenible sea justa e inclusiva y no deje a nadie atrás, como exige en su hoja de ruta el Pacto Verde que promueve la Comisión Europea. La escala del barrio resulta adecuada para enfrentar estos problemas, permitiendo incluir criterios sociales para elaborar propuestas integrales transformadoras, dirigidas a construir ciudades eficientes en el uso de recursos que satisfagan las necesidades básicas de habitabilidad de todos los ciudadanos.

# Análisis experimental de entornos urbanos realizados por la Unidad de I+D UIE3 del CIEMAT

UNIDAD DE I+D SOBRE EFICIENCIA ENERGÉTICA EN LA EDIFICACIÓN (UIE3).CIEMAT

**E. Giancola (1), M.N. Sánchez (2), R. Olmedo (3), H. López (4), S. Soutullo (5), A. Castellanos (6), O. Seco (7), J.A. Díaz (8), J.A. Ferrer (9), M.J. Jiménez (10), M.R. Heras (11)**

(5, 9, 10, 11) Dr. CC. Físicas. Unidad de I+D sobre Eficiencia Energética en la Edificación del CIEMAT, Madrid (España).

(1) Dr. Arquitecta. Unidad de I+D sobre Eficiencia Energética en la Edificación del CIEMAT, Madrid (España).

(2) Dr. Ingeniero Industrial. Unidad de I+D sobre Eficiencia Energética en la Edificación del CIEMAT, Madrid (España).

(3) Ingeniero Técnico Industrial. Unidad de I+D sobre Eficiencia Energética en la Edificación del CIEMAT, Madrid (España).

(4) Arquitecta Técnica. Unidad de I+D sobre Eficiencia Energética en la Edificación del CIEMAT, Madrid (España).

(6) Ingeniero Industrial. Unidad de I+D sobre Eficiencia Energética en la Edificación del CIEMAT, Madrid (España).

(7) Dr. CC. Químicas. Unidad de I+D sobre Eficiencia Energética en la Edificación del CIEMAT, Madrid (España).

(8) Físico. Unidad de I+D sobre Eficiencia Energética en la Edificación del CIEMAT, Madrid (España).

Persona de contacto/Corresponding author: [Silvia.soutullo@ciemat.es](mailto:Silvia.soutullo@ciemat.es) (S.Soutullo)

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0704-2989> (M.N. Sánchez); <http://orcid.org/0000-0002-7803-2278> (R. Olmedo); <http://orcid.org/0000-0001-8623-7479> (M.R. Heras); <http://orcid.org/0000-0002-5441-5346> (M.J. Jimenez); <http://orcid.org/0000-0001-6420-2734> (S. Soutullo); <http://orcid.org/0000-0003-2450-1494> (E. Giancola); <https://orcid.org/0000-0001-8400-1710> (H. López)

## Análisis experimental de entornos urbanos realizados por la Unidad de I+D UIE3 del CIEMAT

### RESUMEN

La evaluación y actuación a escala urbana permite abordar de forma más efectiva la transición energética hacia una reducción del consumo energético y del impacto ambiental en las ciudades. La unidad de I+D UIE3 del CIEMAT tiene una amplia experiencia en la monitorización y caracterización en el ámbito de la edificación y de los entornos urbanos. Entre los principales estudios desarrollados destacan: la monitorización y análisis de las variables climáticas en diversas localizaciones españolas, la monitorización y diseño de redes de distrito de energía positiva (sistemas híbridos basados en energías renovables) y de edificios en áreas urbanas (uso residencial y terciario) y por último las monitorizaciones en espacios abiertos.

**Palabras clave:** entorno urbano, monitorización, distrito energía positiva, análisis climático

## *Experimental analysis in urban environments done by the UIE3 CIEMAT's R&D Unit*

### *ABSTRACT*

*The evaluation and action at the urban scale allows a more effective approach to the energy transition towards a reduction in energy consumption and environmental impact in cities. UIE3 CIEMAT's R&D unit has wide experience in monitoring and characterization in the field of building and urban environments. Among the main studies carried out, the following stand out: monitoring and analysis of climatic variables in various Spanish's locations, monitoring projects and design of positive energy district networks (hybrid systems based on renewable energies) and buildings in urban areas (residential and service sector) and finally the monitoring in open spaces.*

**Keywords:** *urban environment, monitorization, positive energy district, climatic analysis*

## 1. Introducción

Los entornos urbanos juegan un papel crucial en la mejora de la habitabilidad y de la calidad del aire, puesto que son responsables de gran parte del consumo energético y de las emisiones de efecto invernadero. Los edificios de viviendas se concentran principalmente en los entornos urbanos, donde habita la mayoría de la población. En España, el 60% de los habitantes vive en un 1,0% del territorio (1). Sin embargo, las características de los núcleos urbanos también presentan una gran oportunidad para llevar a cabo una transición energética justa y sostenible.

Para hacer frente a los retos climáticos y ambientales, los países europeos se comprometieron a través del “Green Deal” a definir planes estratégicos a corto y largo plazo en España el “Plan Nacional de Energía y Clima (PNIEC)” (2) y el “Plan Estratégico en Tecnologías Energéticas (SET-plan)” (3). La implementación de dichas acciones se debe hacer a través de una correcta evaluación y caracterización de los entornos urbanos, analizando las variables climáticas y las condiciones de contorno, tal y como indica el SET-plan 3.2 de Distritos de Energía Positiva (PED). Dichas consideraciones serán determinantes en la optimización de la demanda energética de los sistemas y en garantizar el confort ambiental y el desarrollo de ciudades de cero emisiones.

### 1.1. Análisis climático

La caracterización del clima en los entornos urbanos conlleva la evaluación del comportamiento de las principales variables meteorológicas. Existen múltiples clasificaciones climáticas a nivel global, como Köppen-Geiger, sin embargo muchas de ellas proporcionan una idea general del clima pero no consideran factores relevantes de las características climáticas urbanas. Factores como la variabilidad de la orografía, la presencia de zonas verdes y grandes masas de agua, las características del suelo, los perfiles de viento e insolación, el impacto del diseño urbano o la actividad humana, hacen que el clima local presente desviaciones con respecto a los valores generales de la región a la que pertenece.

La caracterización del clima se realiza a través de la recopilación de datos procedentes de sensores in-situ, o mediante el uso de datos de satélite de la zona

de interés. En ambos casos serán necesarios largos periodos de medidas, mínimo diez años, asegurando el análisis de los ciclos climáticos naturales. A partir de estas series largas de datos se genera un año representativo de la zona, “Typical Meteorological Year (TMY)”, empleado para predecir el comportamiento energético a largo plazo. En el caso de disponer de campañas experimentales con una duración inferior a diez años, se puede crear un año de referencia. Se emplean procedimientos sintéticos para modelar los patrones climáticos de la zona de estudio cuando no se tienen medidas reales o se dispone únicamente de bases de datos mensuales.

### 1.2. Estructuras urbanas

Las condiciones de contorno modifican el comportamiento energético de la ciudad. De tal modo, las características morfológicas urbanas, las propiedades de los materiales y los perfiles de usuario disminuirán o incrementarán la demanda y el consumo energético en los entornos construidos. Conocer dichas características optimizará el funcionamiento de sus estructuras: edificaciones, espacios abiertos y redes de distrito.

## 2. Proyectos de la UIE3 del CIEMAT

La Unidad de I+D de Eficiencia Energética en la Edificación (UIE3) del CIEMAT ha realizado numerosos proyectos que incorporan campañas de monitorización en diferentes escenarios de entornos urbanos, aplicando diferentes metodologías de análisis a los datos experimentales en función de los escenarios estudiados. Se han registrado y evaluado la variación climática de diferentes poblaciones (4) y su influencia sobre los edificios (5); se ha analizado el comportamiento térmico de diferentes bloques de viviendas en Madrid (6-7); se ha cuantificado la influencia de unas nuevas estructuras urbanas de acondicionamiento térmico sobre un bulevar de Madrid (8-12); se ha monitorizado la respuesta de una micro-red híbrida (13) y se ha estudiado el almacenamiento con zeolitas.

Esta actividad se ha llevado a cabo en el marco de proyectos desarrollados en colaboración con empresas y otros centros de investigación nacionales e interna-

cionales y han sido financiados por la Unión Europea, el Ministerio de Ciencia e Innovación y diferentes Comunidades Autónomas y Ayuntamientos. Entre los proyectos realizados en este área destacan: el programa LIFE ECO-Valle Mediterranean Verandahways (LIFE02 ENV/E/000198), programa OMEGA-CM (S2013/MAE2835), el proyecto ENERGYSIS (RTC-2016-5306-3), el proyecto MAGYSTER (RTC-2017-6221-3), el proyecto ALTENER HOUSES (programa ALTENER II UE), el proyecto REGEN LINK (V programa MARCO UE), y el proyecto SUNRISE (Proyecto Marco de Investigación y desarrollo Tecnológico UE).

## 2.1. Análisis Climático

La correcta caracterización del clima es un punto crítico en la fiabilidad de los estudios en el ámbito urbano. Considerar el emplazamiento real es clave para evaluar aquello que pueda modificar las condiciones climáticas generales de la zona, y por tanto sus condiciones de contorno. De esta forma, se determina el estado psicrométrico de la zona, identificándose los factores de sombra y cuantificándose el potencial de los recursos renovables disponibles.

Con el objetivo de considerar las particularidades de cada zona, se lleva a cabo una monitorización in-situ de las condiciones ambientales exteriores. La UIE3 dispone actualmente de varias estaciones meteorológicas con monitorización continua ubicadas en Madrid, Tabernas y Lubia, en las que ya se han realizado campañas de experimentales de más de diez años de medidas. Otros estudios similares se han llevado a cabo en otras ciudades como Salamanca, Zamora para periodos de tiempo más reducidos. En todos ellos, previamente al inicio de la adquisición de los datos, se definen las variables meteorológicas a medir y sus frecuencias de muestreo y de almacenamiento. Las series de datos registrados son previamente filtrados y tratados, eliminándose en este proceso los valores erróneos o aquellos que son estadísticamente muy improbables o espurios. Finalmente, se genera una base de datos multianual con las condiciones climáticas reales.

En el estudio realizado por Soutullo et al. (14), se desarrolló un método basado en la metodología PAS-COOL para evaluar empíricamente la representatividad climática en dos localizaciones: Madrid y Tabernas (Al-

mería), comparando los resultados con bases de datos climáticas de referencia. Como resultado, se generaron dos nuevos TMY's a partir de los datos experimentales, considerando la temperatura y la radiación solar como las variables meteorológicas con mayor peso (0,25). Además, se identificaron para cada una de las variables meteorológicas los años y el mes con mayor dispersión respecto al valor medio. Recientemente se ha llevado a cabo un estudio comparativo de las condiciones climáticas registradas en el periodo 2008-2017 en Madrid y Tabernas (4). En ambos casos se compara la dispersión entre el comportamiento de la media de los últimos diez años (Exp-10), de un periodo cálido en la década (Exp-5) y de TMY's existentes generados con datos previos al 2010. Se analizan tanto valores anuales como estacionales. Madrid registra un incremento en la temperatura del aire de 0,6°C en el año medio y de 0,9°C en el periodo cálido. En Tabernas, los incrementos fueron respectivamente de 2,4°C y 2,7°C. La Figura 1 muestra una comparativa de los valores estacionales de temperatura, humedad relativa y radiación solar global de un TMY de Madrid con respecto a un año medio y a un año cálido registrado en la última década. Estas gráficas muestran que la última década ha registrado valores más cálidos y secos que los establecidos como representativos en un TMY.

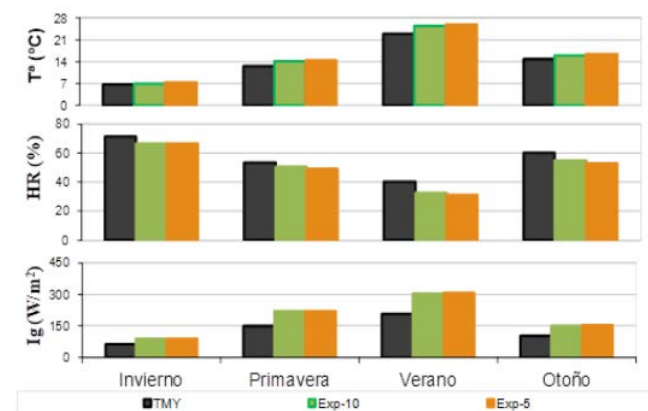


Figura 1 Comparativa de temperatura ( $T^a$ ), humedad relativa (HR) y radiación solar global ( $I_g$ ) de un TMY de Madrid con un año medio de 10 años de medidas y un periodo cálido medido

Una vez obtenidos los valores medios y extremos registrados a lo largo de los últimos diez años, se determinan los patrones de comportamiento del clima mediante

el cálculo de diferentes índices climáticos. Estos índices confirman la misma tendencia en la evolución del clima, aumentando el número de noches tropicales. La generación de mapas superficiales permite visualizar la distribución horaria de las principales variables climáticas.

Partiendo de los ficheros climáticos con valores medios y extremos registrados en la última década, este estudio evaluó el efecto del cambio del clima en la demanda energética de los edificios. Las demandas máximas tanto en calefacción como en refrigeración se registraron en Madrid. La Figura 2 muestra los grados-día de calefacción (HDD) y refrigeración (CDD) estacionales obtenidos para Madrid tanto para el TMY, como para los ficheros experimentales promedio (Exp-10) y extremo (Exp-5). Esta Figura muestra un mayor aumento de las necesidades de refrigeración y una disminución de las necesidades de calefacción de los ficheros experimentales frente al fichero representativo.

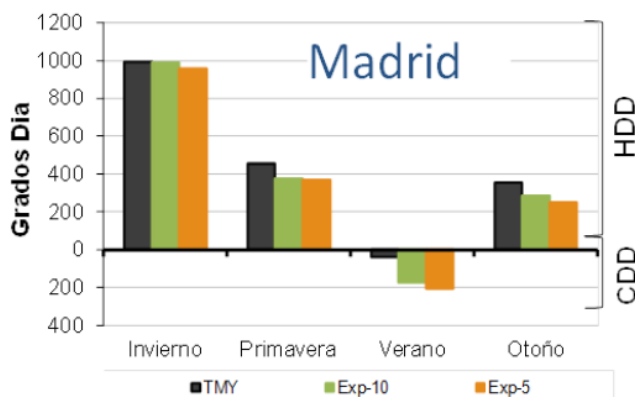


Figura 2 Comparativa de las necesidades de calefacción y refrigeración de Madrid para un TMY y dos ficheros experimentales

Por último, se analizaron las estrategias bioclimáticas a utilizar concluyendo que en Madrid es necesario potenciar las estrategias de refrigeración en el verano y a principios del otoño, mientras que en Tabernas destaca el incremento en las horas de confort en primavera y otoño. Este trabajo se realizó en el marco del Programa OMEGA-CM, y se ha realizado a partir de los datos registrados en las estaciones meteorológicas de los Edificios ARFRISOL en el CIEMAT en Madrid y en la Plataforma Solar de Almería, así como en el LECE ubicado en la Plataforma Solar de Almería (15).

## 2.2. Microclima Urbano

El proyecto LIFE ECO-Valle Mediterranean Verandahways, financiado por la Unión Europea y patrocinado por la EMVS (16), surgió con el objetivo de promover el uso de espacios públicos abiertos en áreas residenciales. El estudio de Arquitectos de Ecosistema Urbano Office diseñó el acondicionamiento térmico de un bulevar, denominado Bulevar Bioclimático, mediante la construcción de tres estructuras cilíndricas o 'Árboles de Aire'. El 'Árbol' sur multimedia está construido con una pantalla de proyección que rodea un cilindro. El 'Árbol' central vegetal está rodeado por una envoltura vegetal interior. El 'Árbol' norte evaporativo (Figura 3) está construido con dieciséis torres de viento y sistemas de evaporación en la parte superior.

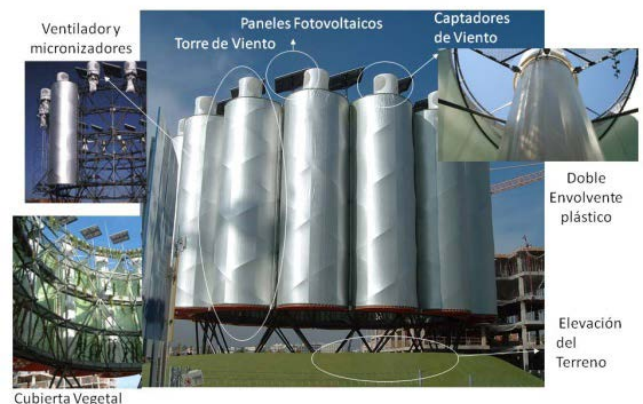


Figura 3 Componentes del 'Árbol' evaporativo del bulevar bioclimático. (Fuente propia)

El CIEMAT se encargó de monitorizar el clima del bulevar, el cilindro norte y sus alrededores (8). Además se han realizado diferentes modelos teóricos para cuantificar el impacto producido por estas estructuras en el bulevar (9-10). Se monitorizaron cuatro escenarios: clima de la zona (Escenario 1), cercanías del 'Árbol' evaporativo (Escenario 2), interior del 'Árbol' evaporativo (Escenario 3) e interior de una torre de viento (Escenario 4). En estas campañas se emplearon sensores cableados de temperatura, humedad relativa, radiación solar, velocidad y dirección del viento, y sensores inalámbricos

de temperatura y humedad relativa, previamente calibrados y elegidos con una incertidumbre en la medida inferior al 3%. Se utilizó un Sistema de Adquisición de Datos (datalogger) para registrar las medidas no inalámbricas. Las medidas de temperatura y humedad se registraron cada diez minutos, y las medidas de viento se registraron cada minuto.

Durante el verano de 2008, el Escenario 1 registró un rango de temperaturas que osciló entre 19-30°C, con una oscilación media diaria mensual de 11°C. El rango medio de humedad relativa diaria fue del 36%. Las velocidades de viento exterior más frecuentes oscilaron entre 1 y 3 m/s, altos porcentajes de periodos en calma y porcentajes inferiores al 25% para velocidades superiores a 4 m/s. La rosa de los vientos muestra una dirección dominante Suroeste, con fuertes componentes Sur y Noreste. Las medidas de temperatura y de humedad del Escenario 2 indicaron la nula influencia de las torres de viento evaporativas sobre los alrededores, limitándose su influencia a la zona peatonal bajo la estructura. En el Escenario 3 se puso de manifiesto la fuerte dispersión del efecto de la refrigeración adiabática para alturas superiores a 4m del suelo. Las medidas de viento obtenidas dentro del recinto mostraron velocidades bajas, efecto originado más por la influencia de la doble envolvente de plástico que de las torres. La disminución máxima de la temperatura alcanzada en la zona peatonal (altura 1m) fue cercana a 6°C, con un valor promedio de 3,5°C. Este enfriamiento adiabático produjo un aumento medio del porcentaje de humedad de aproximadamente el 27% (11). En el Escenario 4 se produjeron dos situaciones durante el verano del 2008: funcionamiento conjunto del ventilador y los micronizadores de agua, y no funcionamiento de estos sistemas. El modo de operación conjunto de la ventilación forzada y de la refrigeración adiabática registró una disminución máxima de temperatura entre la parte superior e inferior de la torre de 9°C, con un valor promedio de 6,5°C. Sin embargo, cuando se produjo únicamente ventilación natural, las diferencias de temperatura se redujeron. Cuando los ventiladores entraban en operación las velocidades de aire a la salida de la torre alcanzaron valores entre 1 y 1,2 m/s; reduciéndose a 0,25 m/s cuando estos sistemas no estaban en funcionamiento (8). La evaluación del confort térmico en la zona peatonal del

‘Árbol’ evaporativo se realizó con el índice de confort térmico Thermal Sensation TS (12). Se emplearon las variables climáticas y las variables registradas y simuladas (11) en las posiciones norte y sur a 1m. Se tuvieron en cuenta dos situaciones. El caso 1 representa el funcionamiento conjunto de los sistemas evaporativos y ventiladores con sombras (caso 1a) y sin sombras (caso 1b). El caso 2 representa el funcionamiento de la ventilación natural de las torres con sombras (caso 2a) y sin sombras (caso 2b). Ambos casos mejoraron los niveles de sensación térmica del bulevar, especialmente cuando la zona peatonal está sombreada (opciones a). La acción combinada de los micronizadores y el ventilador obtuvo mayores porcentajes de confort térmico que la ventilación natural (Figura 4).

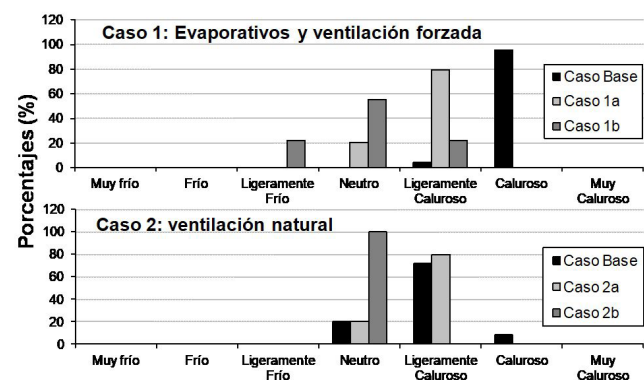


Figura 4 Confort térmico en la zona peatonal del ‘Árbol’ evaporativo con sistemas evaporativos y ventilación forzada (Caso 1) y sin sistemas evaporativos y ventilación natural (Caso 2)

Estos resultados indican que el uso de técnicas pasivas de acondicionamiento térmico de espacios abiertos permite aumentar sus niveles de confort, potenciando la participación ciudadana e impulsando la sostenibilidad social en el vecindario.

En línea con el objetivo del proyecto LIFE ‘ECO-Valle Mediterranean Verandahways’ de mejorar el acondicionamiento térmico de los espacios abiertos mediante la integración de estrategias solares pasivas, la UIE3 del CIEMAT ha diseñado y construido una torre de viento evaporativa en sus instalaciones de Madrid (Figura 5). Esta estructura, ubicada en una zona ajardinada del CIEMAT en Madrid, integra sistemas evaporativos, ventilación forzada y elementos de sombra que permiten



mejorar los niveles de sensación térmica ambientales y aproximarlos a una zona de confort térmico óptimo. La instalación está formada por un tubo cilíndrico de polipropileno encajado en el interior de una estructura de andamios de 4mx4m y elevado 1,3m del suelo. Las dimensiones de la torre son 3m de alto con diámetros superiores e inferiores de 1m y 0,75m respectivamente. En la parte superior se ha instalado un ventilador y una corona variable de micronizadores, los cuales pueden trabajar de manera separada o conjunta. Estos sistemas permiten producir una ventilación adiabática que reduce la temperatura ambiental a costa de aumentar el contenido en humedad. El caudal de aire está controlado por un regulador de flujo variable que permite simular diferentes configuraciones. Finalmente, se encajan diferentes elementos de sombra en la estructura de andamios para simular el efecto de sombra sobre la torre de viento y confinar el aire más frío en un recinto más pequeño.



Figura 5 Instalación de torre de viento evaporativa en el CIEMAT

Los objetivos principales que se persiguen con el estudio de esta instalación son:

- Modelar el comportamiento de las torres de viento en los espacios abiertos, controlando todas sus variables de entrada.
- Evaluar la influencia sobre el funcionamiento de las torres de viento evaporativas de la cantidad de agua y de aire introducidos.
- Analizar el confort térmico alcanzado gracias a la acción combinada de diferentes estrategias pasivas.
- Evaluar la influencia de esta estrategia pasiva de refrigeración sobre el ambiente térmico registrado en las inmediaciones de la torre.

Esta línea de trabajo va a permitir avanzar en la mejora de las condiciones térmicas de espacios abiertos, fomentando su uso como puntos sociales de encuentro y mejorando la calidad del aire exterior de las ciudades.

La UIE3 del CIEMAT también está trabajando en el estudio del microclima urbano y del confort térmico exterior en diferentes tramas urbanas. La ciudad de Madrid ha sido estudiada para un día representativo de verano a través de las variables meteorológicas que ofrece la Red de Calidad del Aire del Ayuntamiento de Madrid (RCAM) y de la distribución tipológica urbana definida en el Instituto Estadístico de la Comunidad de Madrid (IECM). Este día representativo fue obtenido a través de la metodología del Año Meteorológico Típico (TMY) usando el método de ponderación PASCOOL. Para ello, se usaron diez años de medidas registrados en la estación meteorológica del CIEMAT ubicada en Madrid (4). Los valores meteorológicos registrados por la RCAM para el día representativo de verano fueron interpolados y mapeados mediante el método geoes-tadístico Kriging. Este proceso permitió asignar a cada una de las tipologías urbanas del IECM un valor horario ponderado para las variables meteorológicas de temperatura del aire, humedad relativa, velocidad del viento y radiación solar. Los resultados muestran variaciones significativas durante la noche, alcanzando diferencias de temperatura del aire de 2°C y del 16% de humedad relativa entre tipologías compactas de gran altura y tipologías dispersas.

Una vez obtenidos los datos microclimáticos, se evaluó la variabilidad del confort térmico dentro de la ciudad para las diferentes tipologías urbanas mediante el Índice Universal de Confort Térmico (UTCI). El índice UTCI establece una temperatura equivalente para un entorno de referencia tipo, la cual se interpreta mediante una escala de estrés térmico. Su cálculo se obtuvo con el software de simulación SkyHelios para dos barrios representativos de cada una de las tipologías urbanas. Los resultados obtenidos muestran que durante la noche “no hay estrés térmico”, pero se encuentran variaciones entre las tipologías urbanas. De 12:00 a 19:00 la sensación térmica media es “fuerte estrés por calor”, sin embargo, hay áreas para todas las tipologías donde se logra un “estrés por calor muy fuerte”. Considerando el comportamiento diario del índice UTCI, los

Edificios Históricos presentan los peores valores de confort térmico, mientras que las Manzanas Modernas responden mejor al estrés térmico (Figura 6).

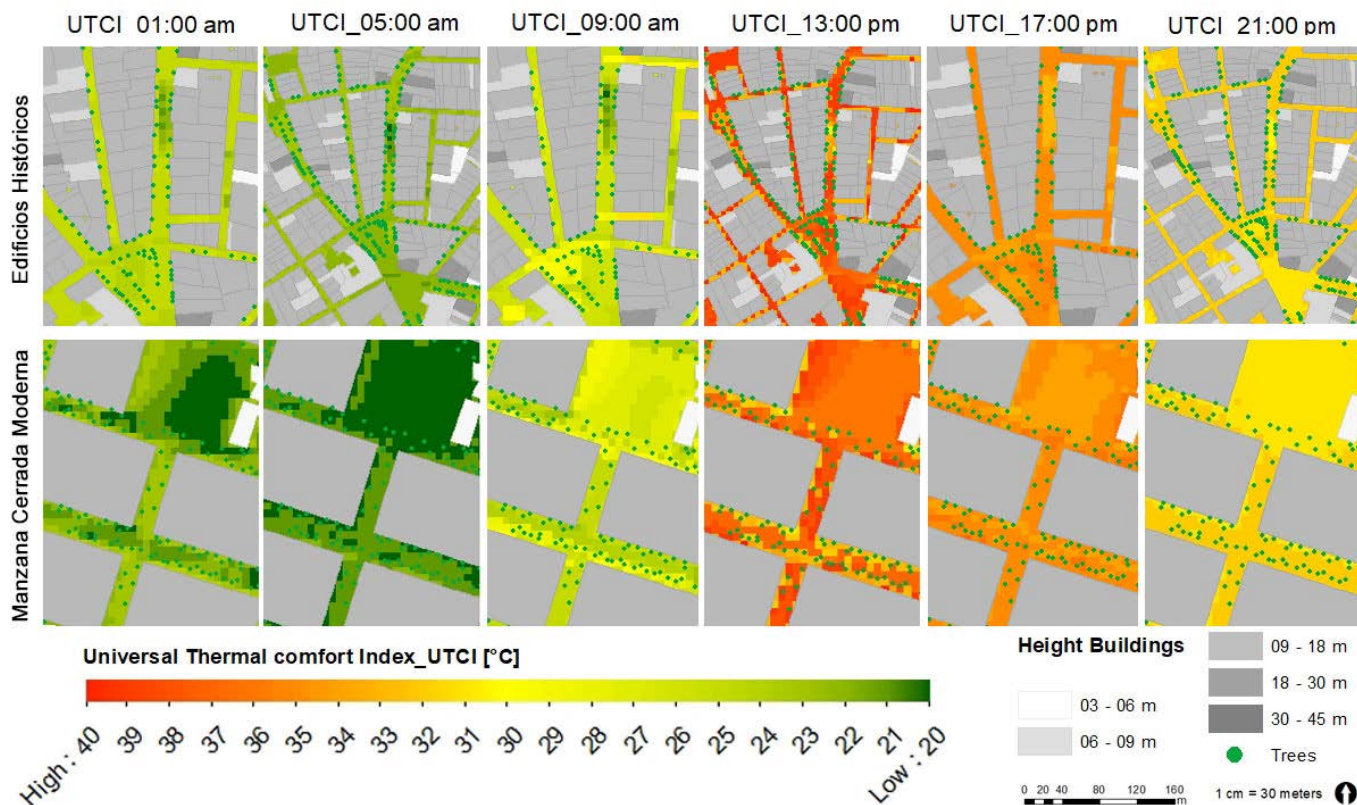


Figura 6 Representación espacial horaria del índice UTCI para la tipología urbana Edificios Históricos (arriba) y Manzana Moderna (abajo).

### 2.3. Generación Distribuida

El proyecto de investigación ENERGYSIS consiste en la ejecución de una instalación experimental de una micro-red híbrida para el estudio y análisis de sistemas aislados. Está ubicada en las instalaciones del CEDER-CIEMAT en Soria, e integra dos módulos habitacionales, generación renovable (térmica y eléctrica) y sistemas de cogeneración (13). Esta microrred se ha estructurado en distintos anillos térmicos que permiten evaluar su comportamiento mediante algoritmos de control inteligentes, maximizando la componente renovable.

La recopilación de los datos de monitorización de los módulos habitacionales, los sistemas de climatización, ACS y electricidad se realiza a través de una red distribuida de sensores y dataloggers. Ésta, consiste en una unidad principal de adquisición de datos constituida por diversos módulos de entrada/salida que se

comunica con el resto de unidades de adquisición distribuidas por la instalación (Figura 7), una por cada módulo habitacional (zonas 1 y 2) y otra para ampliar las capacidades de control de los sistemas de generación junto a la principal (zona 5). El seguimiento de la instalación se realiza a través de un servidor web, que permite modificar los parámetros de configuración, y de un software específico que permite monitorizar y almacenar los valores de medida. Se han instalado sensores de temperatura y humedad en los módulos habitacionales para medir los valores superficiales y la estratificación del aire, sensores de temperatura y caudalímetros en tuberías, y transductores eléctricos y transformadores de medida que se comunican con los sistemas de adquisición de datos a través de convertidores modbus. Con los datos adquiridos por el sistema de monitorización se construyó un modelo simplificado, obteniendo

una fuerte influencia del fenómeno de radiación nocturna en el interior de los módulos habitacionales.

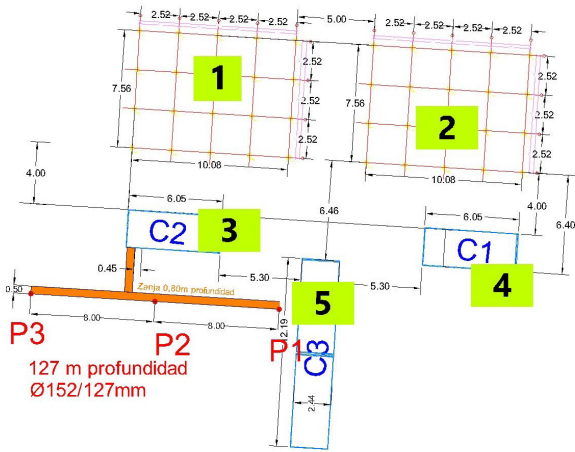


Figura 7 Red distribuida de sensores y dataloggers del proyecto ENERGYIS

Otro de los aspectos fundamentales en la generación distribuida es el almacenamiento, ya que permite ajustar mejor la generación a la demanda de energía de los distritos. Dentro de los objetivos del proyecto MAGYSTER (Módulos Arquitectónicos Activos con Geotermia Y SisTemas de Energías Renovables) se están realizando experimentos con zeolitas en gravas de entre 4 y 8 cm y diferentes condiciones de secado para definir su capacidad de almacenamiento térmico. Los experimentos se realizan ajustando y controlando la evolución temporal y los parámetros ambientales de una serie de baterías de ensayos. Cuando se tiene una humedad ambiental relativa del 20% y una temperatura interna siempre inferior a 27°C, se observa que la zeolita natural secada en mufla a temperaturas de hasta 300°C se activa térmicamente estando a temperaturas inferiores a 26°C al ser hidratada con el aire del ambiente, incrementando su temperatura unos 5°C durante al menos 15 minutos para unos 150 gramos de muestra.

#### 2.4. Bloques de Edificios

En el ámbito de los bloques de edificios, la UIE3 ha colaborado con la Empresa Municipal de la Vivienda y Suelo de Madrid (EMVS) (15) en el análisis del comportamiento energético de viviendas sociales. Esta cola-

boración se ha transformado en la monitorización para mejorar la habitabilidad, la accesibilidad y la sostenibilidad de los bloques de viviendas evaluados, tanto en obra nueva como en los rehabilitados.

Se presenta a continuación la información más relevante referida a tres proyectos de actuación integrada sobre aspectos energéticos en viviendas sociales nuevas y existentes en Madrid (6). La Figura 8 muestra la ubicación de estos proyectos sobre un plano del municipio de Madrid.

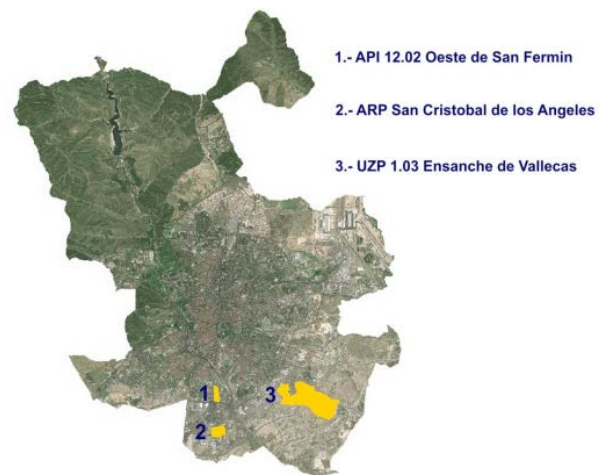


Figura 8 Localización de los planes de actuación en el municipio de Madrid de los proyectos ALTENER II (1), Regen Link (2) y Sunrise (3). (Fuente propia)

Estas actuaciones fueron aceptadas en convocatorias internacionales y con financiación parcial de la Unión Europea (UE), en los que el CIEMAT colaboró con la EMVS. Estos proyectos son:

- Proyecto *ALTENER HOUSES* (Oeste de San Fermín), que impulsa el diseño y la construcción de más de 350 viviendas ubicadas en distintos países de la Unión Europea (Portugal, Dinamarca y España), utilizando diversas técnicas solares pasivas y activas para el aprovechamiento de los recursos naturales.
- Proyecto *REGEN LINK* (San Cristóbal de los Ángeles) (7), se engloba dentro del desarrollo de ocho proyectos demostrativos realizados por promotores públicos de vivienda social distribuidos a lo largo del Noroeste, Este y Sur de Europa. Su objetivo princi-

pal es analizar la mejora térmica alcanzada tras la rehabilitación y construcción de varios edificios.

- Proyecto *SUNRISE* (Nuevo Ensanche de Vallecas), donde se construyen cuatro promociones de viviendas sociales de nueva construcción, ubicadas en cuatro países europeos distintos (Francia, Noruega, Dinamarca y España).

La línea directriz común de estos tres proyectos fue complementar el proceso del diseño arquitectónico, simulación y construcción, con una monitorización de los edificios una vez ocupados (periodo al menos de dos años). Esta evaluación experimental permite conocer el nivel de consecución de los objetivos planteados, así como analizar la adecuación de las soluciones realizadas a los gustos y costumbres de los usuarios, conociendo su nivel de satisfacción. Esta fase experimental ha sido desarrollada, implantada y procesada por la UIE3 del CIEMAT. En los tres proyectos se aplica la misma metodología de evaluación del comportamiento térmico de las viviendas, como se observa en la Figura 9.

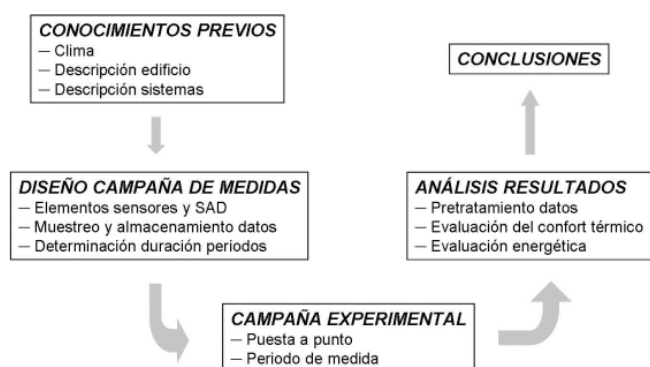


Figura 9 Esquema de las fases de la evaluación energética experimental. (Fuente propia)

La aplicación de esta metodología establece que para obtener resultados fiables de una campaña experimental, es necesario cuidar ciertos detalles, para que las medidas no sean una mera constatación cualitativa de la evolución térmica de las condiciones interiores. Por ello es necesario plantear una serie de pasos sistemáticos que permitan obtener una serie de datos útiles. En primer lugar es necesario realizar un planteamiento lógico del diseño experimental basado en un conocimiento previo

del comportamiento esperado del sistema. En base a ello se define qué tipo de experimentos se van a llevar a cabo, así como cuantas variables y con qué precisión y frecuencia deben medirse. Posteriormente se mide el comportamiento real del edificio y de sus usuarios, intentando no afectar demasiado a su funcionamiento normal. Conforme se van completando las campañas experimentales, se van creando series de datos temporales en función de las medidas registradas que tendrán que ser procesadas antes de uso final. En este proceso se deberán eliminar los valores erróneos o estadísticamente no representativos del comportamiento general de las variables medidas. Finalmente se realiza la evaluación de las viviendas en condiciones reales de uso.

Partiendo de la idea de que cada evaluación experimental requiere un planteamiento específico e individualizado, a nivel general, el estudio de la evolución térmica de estos tres proyectos se evalúa a través de la instalación de un conjunto de sensores que miden magnitudes térmicas y medioambientales. Estos dispositivos registran habitualmente los valores de la temperatura y de la humedad relativa del aire en el interior del edificio, así como las condiciones ambientales exteriores (estaciones meteorológicas: temperatura y humedad relativa del aire exterior, velocidad y dirección de viento, radiación solar global horizontal). El sistema dispone además de un equipo de adquisición de datos, que registra las variables medidas con unas frecuencias de muestreo y de almacenamiento definidas previamente, y durante un periodo de tiempo determinado. Esta información se complementa con el registro individual de los consumos eléctricos y de agua en cada una de las viviendas monitorizadas. Toda esta información, permite la realización de balances energéticos que determinan el comportamiento térmico de las viviendas. La cuantificación del confort térmico se realiza mediante los análisis de la oscilación térmica, del calentamiento o enfriamiento efectivo, y de la evaluación del comportamiento durante los días tipo de cada estación principal.

A modo de ejemplo se presentan dos figuras con algunos resultados obtenidos en dos proyectos diferentes. En la Figura 10 se muestra el balance térmico en un edificio de obra nueva dentro del proyecto Sunrise. Mientras que en la Figura 11 se muestra la comparativa de los valores de temperatura de una vivienda antes y después

de las obras de rehabilitación, dentro del proyecto Regen-Link. La Figura 10 representa el análisis de los grados de calentamiento o de refrigeración efectiva de una de las viviendas monitorizadas en el proyecto Sunrise.

En esta Figura se muestra la diferencia térmica interior/exterior registrada en una vivienda durante el verano frente a los valores ambientales. La cuantificación del confort térmico interior se realiza a través de la proximidad a la banda estival establecida por RITE. En esta Figura se observa que a pesar de registrar valores exteriores superiores a 26°C en gran parte del verano, los valores interiores están ligeramente por encima de la banda de confort térmico.

La Figura 11 muestra la comparativa de los valores de temperatura exterior e interior durante las campañas de 2002 y 2006 en una vivienda del proyecto Regen-Link. A pesar de mostrar periodos climáticos diferentes, se pueden apreciar valores más estables de la temperatura en el interior de la vivienda a lo largo del año 2006. Esto es debido a la existencia de cerramientos con mayor inercia térmica, elementos de sombra exteriores o la inclusión de vidrios dobles. La aplicación de estas estrategias pasivas de renovación de la envolvente han permitido adaptar mejor el comportamiento del edificio a las características climáticas del lugar, posibilitando un mayor acercamiento a las condiciones de confort de manera natural.

Las recomendaciones de las actuaciones de renovación urbana obtenidas en estos proyectos se pueden resumir en: 1) caracterización del parque de viviendas sociales; 2) realización del análisis del comportamiento térmico de los edificios existentes con el objetivo de identificar las medidas más adecuadas para incrementar el ahorro energético y el confort térmico; 3) estudios basados en los datos registrados en las campañas de monitorización, en las que se tienen que considerar: a) el diseño óptimo de la monitorización considerando la ocupación del edificio y el funcionamiento en base a los equipos de acondicionamiento; b) la puesta en marcha de la instalación; c) la verificación de las variables registradas.

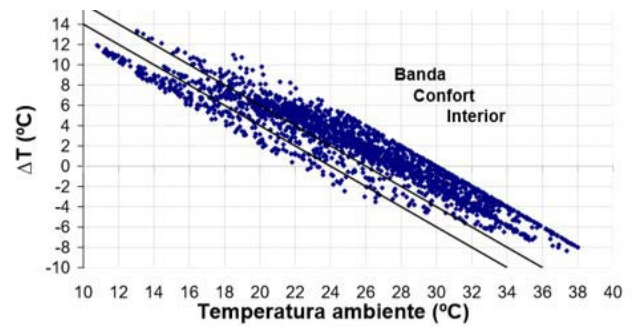


Figura 10 Grados de calentamiento y refrigeración efectiva registrados en una vivienda monitorizada en el proyecto Sunrise.

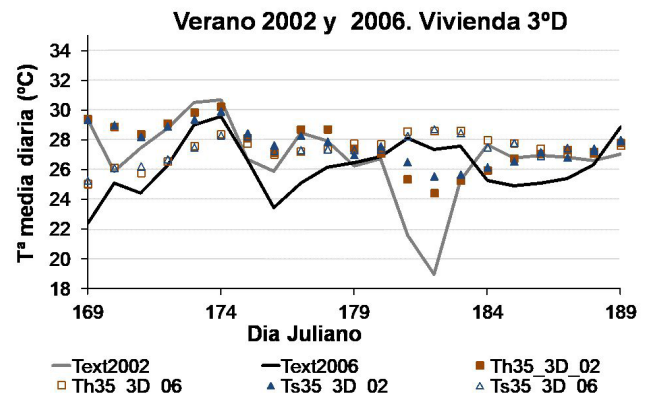


Figura 11 Comparativa de las temperaturas exteriores e interiores en una vivienda del proyecto Regen-Link antes y después de las obras de rehabilitación. (fuente propia)

### 3. Bibliografía

- (1) Eurostat E. Eurostat. Database Web: <https://ec.europa.eu/eurostat/data/database> (Acceso Abril 2020).
- (2) Ministerio para la Transición ecológica. Plan Nacional Integrado de Energía y Clima. IDAE 2020.
- (3) European Commission. EUROPA- SETIS I Strategic Energy Technologies Information System - European Commission. Web: <https://setis.ec.europa.eu/> (Acceso Abril 2020).
- (4) Sánchez, M.N., Soutullo, S., Olmedo, R., Bravo, D., Castaño, S., Jiménez, M.J (2020). An experimental methodology to assess the climate impact on the energy performance of buildings: A ten-year evaluation in temperate and cold desert areas. *Applied Energy* 264, 114730. Doi: 10.1016/j.apenergy.2020.114730.
- (5) Soutullo, S., Giancola, E., Jiménez, M.J., Ferrer, J.A., Sánchez, M.N. (2020). How Climate Trends Impact on the Thermal Performance of a Typical Residential Building in Madrid. *Energies* 13(1), 237. Doi: 10.3390/en13010237.
- (6) Soutullo, S., Sánchez, M.N., Olmedo, R., Giancola, E. y Heras, M.R. (2016). La evaluación Energética como Instrumento para la Renovación Urbana. *Actuaciones en Viviendas Sociales de Madrid*. Ediciones CIEMAT. ISBN: 978-84-7834-75
- (7) Giancola, E., Soutullo, S., Olmedo, R. y Heras, M.R. (2014). Evaluating rehabilitation of the social housing envelope: Experimental assessment of thermal indoor improvements during actual operating conditions in dry hot climate, a case study. *Energy and Buildings*, 75, 264–271. Doi: 10.1016/j.enbuild.2014.02.010
- (8) Soutullo, S. (2015). Caracterización energética de una torre de viento evaporativa en un entorno urbano. Modelado del sistema para cuantificar el acondicionamiento térmico del lugar. Ediciones CIEMAT. ISBN: 978-84-7834-752-0.
- (9) Soutullo, S., Sanchez, M.N., Olmedo, R., Heras, M.R. (2011). Theoretical model to estimate the thermal performance of an evaporative wind tower placed in an open space. *Renewable Energy*, 36(11), 3023-30. Doi: 10.1016/j.renene.2011.03.035.
- (10) Soutullo, S., Sanjuan, C., Heras, M.R. (2012). Energy performance evaluation of one evaporative wind tower. *Solar Energy*. 86(5), 1396-1410. Doi: 10.1016/j.solener.2012.02.001.
- (11) Soutullo, S., Olmedo, R., Sanchez, M.N., Heras, M.R. (2011). Thermal conditioning for urban outdoor spaces through the use of evaporative wind towers. *Building and Environment*, 46(12), 2520-2528. Doi: 10.1016/j.buildenv.2011.06.003.
- (12) Soutullo, S., Sanjuan, C., Sánchez, M.N., Zarzalejo, L.F., Enríquez, R., Heras, M.R. (2012). Comfort Evaluation in an Urban Boulevard by Means of Evaporative Wind Towers. *Energy Procedia* 30, 1226-1232. Doi: 10.1016/j.egypro.2012.11.135.
- (13) Castellanos, A., Heras, M.R., Ferrer, J.A., (2018 Junio). ENERGYSIS: Desarrollo de un sistema transportable de isla energética para estructuras modulares de baja demanda y alta eficiencia. Trabajo presentado en el XVI Congreso Ibérico y XII Congreso Iberoamericano de Energía Solar, Madrid, España.
- (14) Soutullo, S., Sánchez, M.N., Enríquez, R., Jiménez, M.J. y Heras, M.R. (2017). Empirical estimation of the climatic representativeness in two different areas: Desert and Mediterranean climates. *Energy Procedia*, 122, 829–834. . Doi: 10.1016/j.egypro.2017.07.415.
- (15) Monitorización de Sistemas Constructivos, Edificios y Entornos Urbanos en la Unidad de I+D UIE3 del CIEMAT. Medida directa, indirecta e índices. Capítulo en este libro.
- (16) Empresa Municipal de la Vivienda y Suelo (EMVS). Web <http://www.emvs.es> (Acceso Abril 2020).

# Monitorización de la isla de calor en la ciudad de Madrid

Compendio de experiencias derivadas del proyecto MODIFICA

ABIO. UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID (UPM)

**M. Núñez-Peiró (1), C. Sánchez-Guevara (2), F.J. Neila González (3)**

(1) Arquitecto. Investigador del grupo de investigación ABIO. Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Universidad Politécnica de Madrid (España)

(2) Doctora arquitecta. Profesora Ayudante Doctora. Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Universidad Politécnica de Madrid (España)

(3) Doctor arquitecto. Catedrático de Universidad. Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Universidad Politécnica de Madrid (España)

Persona de contacto/Corresponding author: miguel.nunez@upm.es (M. Núñez-Peiró)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3895-6791> (M. Núñez-Peiró)

## Monitorización de la isla de calor en la ciudad de Madrid. Compendio de experiencias derivadas del proyecto MODIFICA

### RESUMEN

La correcta evaluación del comportamiento energético de los edificios hace necesario avanzar sobre el conocimiento del clima urbano, con el objetivo de desarrollar archivos climáticos de mayor precisión que permitan incorporar el contexto climático urbano de los edificios. Bajo esta premisa se desarrollaron varias campañas de monitorización a escala urbana en el marco del proyecto MODIFICA (BIA2013-41732-R), el cual tenía como objetivo conocer el impacto de la isla de calor urbana sobre el comportamiento energético de las viviendas madrileñas. En primer lugar, se realizaron una serie de transectos que permitieron obtener una foto fija de la isla de calor en momentos puntuales, conociendo así cómo había evolucionado ésta a lo largo de los últimos años. Tras esta primera campaña se desplegó una red de sensores fijos que, mediante mediciones horarias a lo largo de varios años, ha permitido definir las fluctuaciones de temperatura debidas a la isla de calor a lo largo de los meses, los días y las horas.

**Palabras clave:** isla de calor urbana; transectos urbanos, monitorización, clima urbano, estandarización

## *Monitoring the urban heat island of Madrid. Compendium of experiences from the MODIFICA project*

### ABSTRACT

*The correct evaluation of the building's energy performance makes it necessary to improve the urban climate's knowledge, since it is necessary for incorporating the urban climatic context of the buildings and developing more accurate weather files. On this basis, several monitoring campaigns were developed at the urban scale within the framework of the MODIFICA Project (BIA2013-41732-R), which aimed to find out the impact of the urban heat island on the energy performance of Madrid's homes. First, a battery of transects were carried out, allowing to obtain a fixed picture of the urban heat island at certain points, thus enabling comparisons with recent years. After this first monitoring campaign, a network of fixed sensors was deployed and, through hourly measurements over several years, made it possible to define the temperature fluctuations due to the urban heat island over the months, days and hours.*

**Keywords:** *Urban Heat Island; urban transects; monitoring, urban climate, standardisation*



## 1. Introducción

Actualmente la estimación de demanda de energía de los edificios se ha convertido en algo fundamental para la mejora de los estándares de eficiencia energética del parque de viviendas. Esta necesidad de estimación resulta relevante tanto en las actuaciones de rehabilitación como en el desarrollo de nuevas promociones en las que las exigencias de bajo consumo son más estrictas.

Uno de los factores clave en el comportamiento energético de los edificios y, por tanto, en su evaluación es el clima. A lo largo de los últimos años el gran avance de los programas de simulación ha supuesto el desarrollo en paralelo de los archivos climáticos necesarios para una evaluación detallada de las demandas de calefacción y refrigeración de los edificios. A pesar de este desarrollo cabe destacar que en la mayor parte de casos los datos más detallados y con los que se generan estos archivos climáticos provienen de observatorios situados en las afueras de las ciudades y por tanto con una baja representatividad del clima urbano existente en las mismas.

### 1.1. El proyecto MODIFICA

Uno de los fenómenos más relevantes o que modifica en mayor grado el clima urbano es la Isla de Calor Urbana (ICU). Sobre esta premisa se desarrolló el proyecto MODIFICA (BIA2013-41732-R) en el cual se estudió el impacto de la ICU sobre el comportamiento energético de las viviendas madrileñas. Para ello fue necesario llevar a cabo una monitorización de la isla de calor para la cual se desplegó una red de sensores de monitorización de temperatura y humedad.

Esta monitorización fue necesaria puesto que los modelos numéricos existentes no disponen de la capacidad suficiente como para determinar con precisión los intercambios energéticos que se producen entre el edificio y su entorno inmediato (es decir, en la escala microclimática). Junto a la incertidumbre que rodea a la modelización numérica en esta escala se encuentran varias limitaciones técnicas, como el hecho de que resolver las ecuaciones de un sistema tan amplio y complejo como el urbano requiere de una muy elevada capacidad de computación (Mirzaei, 2015; Mirzaei & Haghighat, 2010).

De este modo, a lo largo del proyecto MODIFICA se llevaron a cabo varias campañas de monitorización de la isla de calor de Madrid, cada una de ellas con unos objetivos específicos, y que partieron en su origen de los estudios previos existentes relativos al clima urbano de la ciudad.

### 1.2. La isla de calor urbana de Madrid. Antecedentes

Los primeros estudios que se llevaron a cabo en la ciudad de Madrid coinciden con los desarrollados en el resto de Europa durante la segunda mitad del siglo XX. Estos estudios consistieron, fundamentalmente, en el desarrollo de mediciones urbanas en movimiento, a través de la realización de los que se conocen como transectos urbanos (véase el apartado 2.1). Centenares de ciudades alrededor del mundo cuentan hoy en día con algún estudio de su isla de calor basada en esta metodología, la cual es, quizás, el primer paso en el estudio del clima urbano. A partir de ellos se han desarrollado multitud de estudios, existiendo una amplísima bibliografía al respecto (Santamouris, 2007, 2015), y poniendo de manifiesto la gran complejidad de este fenómeno.

En el caso de Madrid, los primeros estudios fueron desarrollados en la década de los ochenta por un equipo de investigadores de la Universidad Autónoma de Madrid (López Gómez, 1985; López Gómez, López Gómez, Fernández García, & Arroyo Ilera, 1988). Estos estudios se realizaron siguiendo la metodología de los transectos urbanos, y a estos les siguieron muchos otros (Almendros & López Gómez, 1995; Fernández García & Galán, 1995). Más recientemente se han desarrollado algunos basados en mediciones remotas (Sobrino et al., 2012) e, incluso, se ha llegado a plantear un modelo numérico (Salamanca & Martilli, 2010). También es conveniente señalar el estudio de detalle del clima urbano para la ciudad de Madrid desarrollado por el equipo de Felipe Fernández (Fernández García, Allende Álvarez, Rasilla Álvarez, Martilli, & Alcaide Muñoz, 2016).

A pesar de todos estos antecedentes, ninguno de estos estudios permitía obtener un perfil de temperaturas en régimen horario, necesario para poder integrar los efectos de la isla de calor en la simulación energética. Con este objetivo se desarrollaron las mediciones del proyecto MODIFICA. En el siguiente apartado se aportan detalles de cómo se llevaron a cabo.

## 2. Metodología

### 2.1. Mediciones mediante transectos urbanos

Tal y como se apuntaba anteriormente, la metodología de los transectos urbanos ha sido ampliamente utilizada para obtener una primera imagen precisa de la isla de calor. Esta metodología consiste en el desarrollo de recorridos transversales a la ciudad, utilizando algún tipo de vehículo, y mediante los cuales se obtienen medidas de temperatura cuasi simultáneas en una gran cantidad de puntos urbanos. Estas mediciones pueden componerse en perfiles de temperatura, que resultan de mucha utilidad para observar la variación de las temperaturas al pasar por diferentes entornos urbanos. También resultan de gran utilidad para desarrollar mapas de temperatura, cuyo grado de precisión dependerá de la cantidad de recorridos y de la densidad de puntos de medición que se incluyan en ellos.

En este caso se planificó la realización de tres recorridos simultáneos. Uno norte-sur, otro noreste-suroeste, y otro noroeste-sureste. Este planteamiento, que además de atravesar la ciudad de Madrid también pasaba a través de otras ciudades como Getafe, Alcobendas o Alcorcón, fue idéntico al planteado 30 años antes en la investigación de López Gómez et al. (1988). La intención subyacente fue la de obtener una imagen actualizada de la isla de calor de la ciudad, pues se partía de la hipótesis de que los cambios urbanos acontecidos en la ciudad deberían haber afectado de algún modo a la isla de calor.

A pesar de la intención de replicar estas mediciones, los recorridos no pudieron ser exactamente coincidentes debido a los cambios y restricciones que se han ido introduciendo a lo largo de estos años, tanto en la estructura como en la jerarquía urbana. Sin embargo, ello no impidió recoger los datos en 100 de los 101 puntos planteados en el estudio original (trasladándose únicamente el punto de medición de la Puerta del Sol a la cercana Plaza de Canalejas). Para poder diseñar estos recorridos se utilizó un sistema de información geográfica, en el cual se desarrolló una red de transporte continua a través de los diferentes municipios de alrededor de Madrid, y en la que se incorporaron las restricciones de direccionalidad y de paso asociadas al tráfico urbano. Para configurar

la conectividad de esta red de transporte se utilizó la base de datos de OpenStreetMap y la extensión de ArcGIS Network Analyst (ESRI, 2016).

Para realizar las mediciones se emplearon tres dataloggers Testo 175 T2, además de una sonda de temperatura ambiente NTC Testo 0613 1712. Esta sonda se fijaba al exterior del vehículo y garantizaba, cuando estaba en movimiento, un tiempo de respuesta prácticamente instantáneo. Todos los recorridos se registraron vía GPS, lo que permitió trasladar posteriormente estas mediciones al sistema de información geográfica. Este procedimiento permitió realizar las mediciones en movimiento, gracias a lo cual se llevaron a cabo registros de temperatura cada 10 segundos, incrementando el número total de datos en cada sentido desde los 100 originales hasta unos 1000 puntos.

Para realizar las mediciones se escogió la horquilla entre las 21:00 y las 23:00 UTC, desarrollándose en días con condiciones atmosféricas similares: tiempo anticiclónico y viento en calma. Estas condiciones fueron elegidas dado que favorecen la formación de la isla de calor más intensa. La primera de estas mediciones se desarrolló el 15 de julio de 2015 y se repitió otras cuatro veces, en el entorno de un mes después de los solsticios y equinoccios. Los recorridos se desarrollaron de ida y vuelta, pasando dos veces por cada punto de medición, con el fin de obtener la media de temperatura entre ambos instantes. De esta manera se amortiguaban las diferencias producidas por la diferencia temporal.

Una vez obtenidos los datos de las mediciones se procedió a la generación de los mapas de isotermas. Los mapas se generaron, de nuevo, en un sistema de información geográfica. Se empleó la técnica del krigeado (kriging), el cual consiste en una correlación espacial múltiple que se ajusta en función de un semivariograma, un modelo de interpolación espacial. En este caso se utilizó un semivariograma exponencial, el cual mostraba un buen comportamiento con todo el conjunto de datos y había sido empleado en estudios anteriores enfocados en la predicción de variables meteorológicas y de contaminación (Palomino, Vivanco, Theobald, Garrido, & Martín, 2015). Finalmente, se incorporó al krigeado la información de un modelo digital del terreno (MDT) con el fin de incorporar las diferencias de cota en el proceso de interpolación.

De este proceso se derivaron mapas de isotermas para los diferentes momentos del año en el que se desarrollaron las mediciones. También se generaron para una de las noches de verano de 1985 partiendo de los datos recogidos por López Gómez et al. (1988). Esto permitió homogeneizar el proceso de formación de los mapas de isotermas y comparar la evolución de la isla de calor a lo largo de estos años. Para más información puede consultarse la referencia (Núñez Peiró, Sánchez-Guevara, & Neila González, 2017).

## 2.2. Mediciones continuas mediante puntos fijos

Una de las principales limitaciones de la medición mediante transectos urbanos es que únicamente aportan una imagen fija de la isla de calor. Como ya se apuntaba en la introducción, esto supone un impedimento a la hora de integrarla en la simulación energética, donde se necesitan registros horarios. Para suplir esta carencia se planteó la monitorización continua en varios puntos fijos de la ciudad.

Esta red se implantó en el interior del cañón urbano siguiendo el ejemplo de otros proyectos desarrollados en varias ciudades europeas (Muller, Chapman, Grimmond, Young, & Cai, 2013). Sin embargo, su diseño difiere ligeramente del desarrollado en otros lugares.

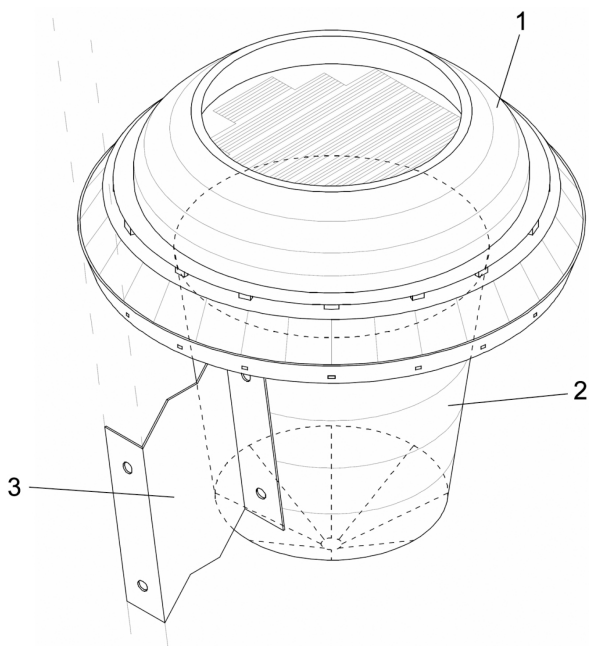


Figura 1. Axonometría de la patente del abrigo meteorológico para sensores urbanos desarrollada para la monitorización continua durante el proyecto MODIFICA.

En este caso, la distancia entre los puntos de medición aumenta de forma gradual desde un punto central, evitando la existencia de ejes predominantes.

La ubicación de los sensores se realizó siguiendo las recomendaciones de la Organización Mundial de la Meteorología para mediciones en entornos urbanos (WMO, 2017). Entre sus indicaciones está la de situar los equipos a una altura mayor de la recomendada en los entornos no urbanos, fundamentalmente por el riesgo de que la re-irradiación de las superficies urbanas afecte a la medición. También se incluyen recomendaciones en cuanto a la recogida de las características del entorno urbano y la representatividad de las mediciones. En relación a esto último debe señalarse que la ubicación de los sensores se caracterizó siguiendo las “zonas climáticas locales” (“Local Climate Zones” en inglés) descritas por Stewart y Oke (2012), y que facilita la comparación entre puntos de medición en entornos urbanos. También se emplearon los mapas de isotermas desarrollados a partir de los transectos urbanos para determinar la posición de los puntos de medición.

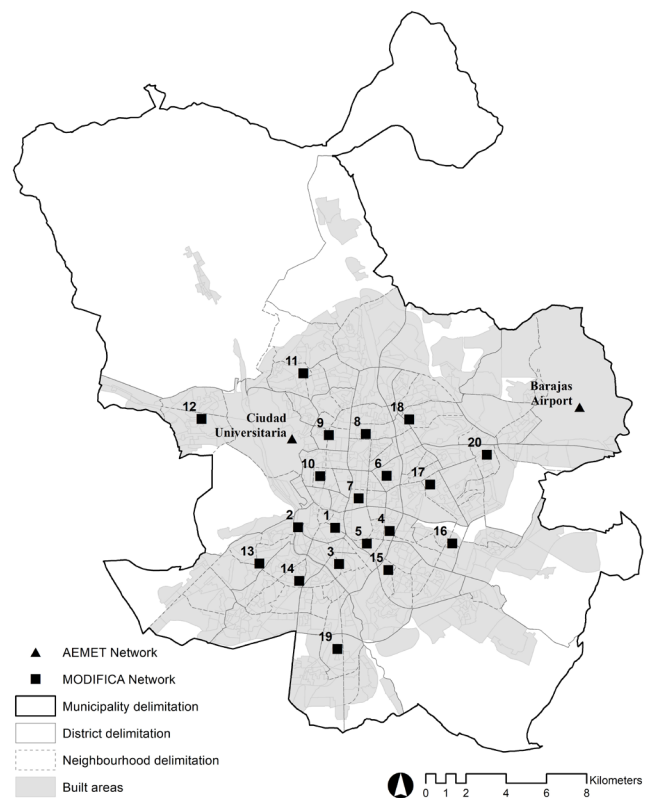


Figura 2. Ubicación de los sensores de la red de monitorización fija

Se utilizaron un total de 20 equipos de medición, formados por un termohigrómetro de exterior (HOBO Pro v2 U23-001) y un abrigo meteorológico de ventilación mecánica diseñado especialmente para el desarrollo de estas mediciones y posteriormente patentado (ES-2642617-B2, 2018). Se utilizaron como soporte las farolas de la vía pública, para lo cual hubo que contar con la autorización de la Subdirección General de Conservación de Vías Públicas e Infraestructuras Públicas. La ubicación de los sensores puede verse en la Figura 2.

La red de medición estuvo en funcionamiento desde el 22 de julio de 2016 hasta el 14 de octubre de 2019, ambos inclusive. Durante estos tres años se realizaron revisiones recurrentes de los equipos cada seis meses, momento en el cual se procedía a la descarga de datos y se realizaban las siguientes comprobaciones:

- Comprobación del correcto registro de datos.
- Comprobación del nivel de memoria del dispositivo.
- Comprobación del nivel de batería del dispositivo.
- Limpieza exterior del abrigo meteorológico.
- Comprobación del funcionamiento del ventilador del abrigo meteorológico.

Las series de datos durante estos tres años está prácticamente completa para 19 de los 20 equipos de medición, únicamente contando con una interrupción de 68 horas seguidas debida a un problema de falta de almacenamiento ocurrido en todos los equipos en octubre de 2017. En el caso del sensor situado en el casco histórico, la serie llega únicamente hasta octubre de 2018, puesto que tuvo que ser retirado al comenzarse las obras de renovación en la calle Atocha.

Todos los datos recabados fueron sometidos a un proceso de control de calidad de datos siguiendo los estándares de la Organización Mundial de la Meteorología (WMO, 2017). Este análisis consistió, primero, en una prueba de plausibilidad; es decir, los valores deberían situarse dentro de unos rangos razonables. En segundo lugar, se examinó su consistencia temporal analizando los cambios producidos en la temperatura en diferentes escalas temporales (ventanas de 1, 2, 3, 6 y 12 horas). En tercer lugar, se evaluó su consistencia espacial utilizando un múltiplo de la desviación estándar de todas las mediciones. Los valores que, de acuerdo con cada uno de estos tests, se situaban fuera del rango determinado como razonable, se marcaban

como sospechosos. Si dos de estos tests señalaban al mismo dato, éste era señalado como erróneo.

Tabla 1. Descripción de los sensores

	ID	Nombre
<b>Red MODIFICA</b>	1	Embajadores
	2	Imperial
	3	Palos de Moguer
	4	Ibiza
	5	Pacífico
	6	Guindalera
	7	Castellana
	8	Hispanoamérica
	9	Cuatro Caminos
	10	Arapiles
	11	Peñagrande
	12	Aravaca
	14	Opañel
	15	San Diego
	16	Horcajo
	17	Pueblo Nuevo
	18	Canillas
	19	Los Ángeles
	20	Canillejas
	<b>Red AEMET</b>	901
902		Retiro
903		Cuatro Vientos
904		Ciudad Universitaria
905		El Goloso

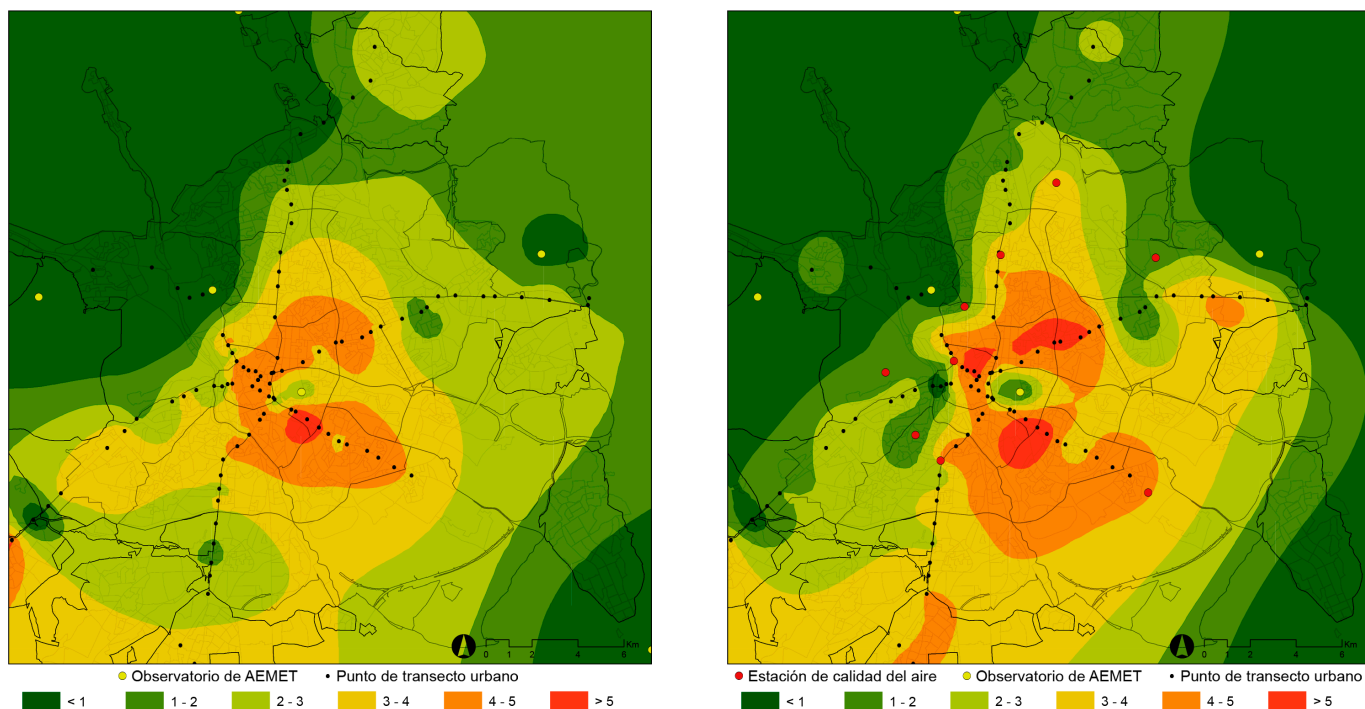


Figura 3. Mapas de isotermas para una noche de julio de 1985 (izquierda) y de 2015 (derecha)

### 3. Resultados y discusión

A través de los resultados obtenidos de las distintas campañas de monitorización llevadas a cabo entre los años 2015 y 2019 se han podido establecer las variaciones que se han producido a lo largo de los últimos años en la isla de calor, así como la propia fluctuación que se produce de manera interestacional y diaria.

#### 3.1. Evolución de la ICU a lo largo de los años

De acuerdo con los mapas de isotermas presentados en la Figura 3, la isla de calor de Madrid se presenta de forma concéntrica con un desarrollo más pronunciado en el eje norte-sur, siguiendo el crecimiento urbano de la ciudad. Como cabía esperar, las temperaturas más bajas se registran en los alrededores de la ciudad, destacando Ciudad Universitaria como una de las zonas más frescas. También resulta llamativa la influencia del parque de El Retiro, el cual parece funcionar a modo de isla de frescor. Los núcleos urbanos periféricos también presentan variaciones de temperatura relevantes, de aproximadamente 2-3 °C, en comparación con sus periferias. En general, las

variaciones intraurbanas del tejido urbano parecen afectar a las diferencias de temperatura, con una clara capacidad de las grandes zonas verdes para disipar el calor de los núcleos urbanos, y de las zonas densas y poco permeables para almacenarlo.

Si se compara el mapa de isotermas de julio de 1985 con el elaborado a partir de las mediciones de julio de 2015, se puede observar cómo la isla de calor se ha extendido, acompañando al desarrollo urbano que la ciudad ha experimentado en estos últimos 30 años. En este punto debe recordarse que la metodología para generar los mapas de isotermas ha sido idéntica en ambos casos, contando con la misma información complementaria (observatorios de AEMET) y con el mismo procedimiento para establecer la temperatura de referencia (primer decil de temperaturas registradas durante los transectos).

El foco más cálido, el que supera los 4 °C, parece que se ha extendido a varias zonas de la ciudad, únicamente interrumpido por la presencia de El Retiro. Sin embargo, la isla de calor parece no haber aumentado en intensidad, ya que los valores máximos registrados en ambos momentos son similares.

Estos resultados pueden tener dos lecturas: por un lado, que existe una relación de interdependencia espacial entre las diferentes zonas urbanas, por lo que a medida que la ciudad crece alrededor de un punto, este es menos capaz de disipar el calor. Los movimientos convectivos del aire podrían ser una explicación para ello, dado que el aire caliente de los centros urbanos, al elevarse, sería reemplazado por el aire de su entorno inmediato. Este entorno estaría más o menos caliente en función del tipo de tejido, por lo que favorecería en mayor o menor medida el enfriamiento del tejido central.

La segunda lectura es que la intensidad de la isla

de calor parece depender del propio tejido urbano. Esto explicaría que, a pesar del aumento de tamaño de la ciudad producido en las últimas décadas (y, como ya se ha observado, de la extensión de la isla de calor), el centro urbano consolidado registra intensidades de isla de calor similares en ambos momentos. Es decir, la intensidad de la isla de calor puede tener un techo de intensidad, y es probable que éste sea una combinación de las características del tejido urbano y de los condicionantes climatológicos propios de la región. La extensión urbana que lo rodea prevendría su refrigeración al calentar el aire procedente del entorno no urbano.

Tabla 2. Resumen de los estadísticos de la temperatura ambiente registrada durante el primer año de mediciones continuas en 20 puntos fijos (2016-2017).

ID	Barrio	Media	Mínima	P10	P25	P50	P75	P90	Máxima	Rango	Dev. est.
1	Embajadores	19.3	-1.4	8.0	11.8	19.5	26.1	31.2	40.4	41.8	8.7
2	Imperial	18.0	-4.4	5.9	10.6	17.9	25.2	30.7	41.5	45.9	9.4
3	Palos de Moguer	19.1	-2.6	7.3	11.5	19.2	26.1	31.4	40.3	42.8	9.0
4	Ibiza	18.8	-2.2	7.4	11.3	18.8	25.7	30.8	39.7	41.9	8.8
5	Pacífico	19.1	-1.2	7.8	11.7	19.1	25.8	30.8	40.7	41.9	8.6
6	Guindalera	18.5	-2.4	7.2	10.9	18.5	25.3	30.4	40.8	43.2	8.8
7	Castellana	18.8	-1.9	7.8	11.5	18.8	25.4	30.2	39.7	41.6	8.4
8	Hispanoamérica	18.4	-2.0	7.4	11.1	18.4	25.1	30.1	39.6	41.6	8.5
9	Cuatro Caminos	18.8	-2.0	7.6	11.2	19.0	25.6	30.5	39.9	42.0	8.6
10	Arapiles	18.6	-1.7	7.6	11.3	18.7	25.3	30.0	39.0	40.6	8.4
11	Peña grande	18.0	-2.4	6.6	10.6	17.8	24.6	29.8	40.9	43.4	8.8
12	Aravaca	17.6	-4.4	5.3	10.1	17.4	24.8	30.5	40.5	44.8	9.4
13	Los Cármenes	17.9	-4.7	5.6	10.2	17.8	25.2	30.5	40.8	45.6	9.4
14	Opañel	18.6	-3.0	6.6	10.9	18.6	25.7	31.1	41.6	44.6	9.2
15	San Diego	19.2	-1.9	7.5	11.5	19.2	26.2	31.4	40.5	42.5	9.0
16	Horcajo	17.7	-4.0	5.9	10.0	17.5	24.7	30.3	41.0	45.0	9.2
17	Pueblo Nuevo	18.4	-2.7	7.0	10.9	18.4	25.3	30.5	40.2	42.9	8.8
18	Canillas	17.8	-3.6	6.1	10.2	17.7	24.7	30.1	40.0	43.6	9.0
19	Los Ángeles	18.5	-3.1	6.2	10.7	18.5	25.8	31.3	41.0	44.1	9.4
20	Canillejas	18.4	-2.6	6.6	10.7	18.2	25.3	30.8	41.4	43.9	9.1

### 3.2. Evolución de la ICU a lo largo de los meses

De los registros obtenidos a través de las mediciones continuas en 20 puntos fijos se ha podido estudiar la evolución de la isla de calor a lo largo de los meses. La Tabla 2 muestra un resumen de la temperatura del aire registrada durante el primer año de mediciones. Se puede observar que la diferencia de temperatura entre

el punto urbano más frío (Aravaca) y el más cálido (Embajadores) fue, de media, de 1.7 °C. Las temperaturas mínimas presentaron mayores diferencias intraurbanas que las máximas, lo que se corresponde con el hecho de que la isla de calor es un fenómeno nocturno. Se puede también observar una cierta asimetría noche/día en los puntos de medición: aquellos que tienden a re-

gistrar las temperaturas más altas durante la noche (es decir, en las mínimas), registran normalmente las temperaturas más bajas durante el día (en las máximas).

Otra característica que se puede observar es que las temperaturas mínimas más bajas no se registran de forma homogénea por los puntos más periféricos, sino que se concentran en el entorno de la Casa de Campo y la vaguada del Manzanares (noreste de la ciudad, puntos 02, 12 y 13). La canalización del aire frío a lo largo de esta vaguada, por la cual descendería el aire más frío por gravedad sin encontrarse obstáculos urbanos relevantes, parece una explicación razonable (Fernández García et al., 1996). Por último, merece la pena destacar las variaciones que se producen tanto en la desviación típica como en los rangos de temperatura observados en cada ubicación, los cuales apuntan hacia una importante amortiguación de la onda térmica en los puntos donde se registran mayores intensidades de isla de calor.

### 3.3. Evolución de la ICU a lo largo de las horas

En cuanto a la evolución horaria de las temperaturas, en las Figuras 1 y 2 se muestran la variación de la isla de calor a lo largo de varios días de verano y de invierno. En estas figuras se representan las temperaturas de los 20 puntos de medición, destacándose las registradas en Aravaca (periferia, en azul) y en Embajadores (zona centro, rojo). También se representan las temperaturas registradas por los observatorios de la AEMET de Barajas y Retiro.

En primer lugar, puede observarse una fuerte amortiguación de la onda térmica, tal y como se avanzaba anteriormente, en el punto urbano más céntrico. Debe señalarse que esta amortiguación se concentra en las temperaturas mínimas, no observándose grandes diferencias en las temperaturas máximas. También se observa una clara diferenciación entre la noche y el día, pudiéndose comprobar que las diferencias de temperatura más relevantes se concentran en la noche, y llegándose a observar hasta 6-7 °C de diferencia tanto en verano como en invierno.

La isla de calor parece alcanzar su máximo justo antes del amanecer, entre las 5 y las 8 horas UTC, dependiendo del momento del año. También se observa que aproximadamente al atardecer comienza a conformar-

se la isla de calor, entre aproximadamente las 17 y las 20 horas UTC. Precisamente debido a que las noches son más largas en invierno se puede observar que la intensidad de isla de calor es, de media, mayor en invierno que en verano. Sin embargo, su máxima intensidad parece ser muy parecida. Esto es indicativo de una estacionalidad muy reducida o nula, lo que sería contrario a lo observado en estudios previos desarrollados mediante transectos urbanos en la ciudad de Madrid. Esto sería, además, de gran utilidad en el desarrollo de futuras mediciones, dado que podría implicar que para extraer las características de los perfiles de temperatura urbanas no sería necesario realizar campañas de monitorización de al menos un año, sino tan solo del tiempo suficiente como para poder capturar las variaciones más relevantes producidas por las diferentes condiciones meteorológicas.

Por último, resulta interesante la intercomparabilidad que los datos recogidos por la red del proyecto MODIFICA y los obtenidos por los observatorios de la AEMET muestran. Entre ellos no parece haber discrepancias relevantes, siguiendo una tendencia similar a lo largo de todo el día. No se observa sobrecalentamiento en los sensores, lo que indica que los abrigos meteorológicos funcionaron correctamente. Tampoco se observa que los abrigos meteorológicos redujeran el enfriamiento de los sensores, dado que algunos de los puntos periféricos alcanzaron cotas de enfriamiento similares a las obtenidas por el observatorio de Barajas. En cualquier caso, sería relevante poder disponer de un protocolo homogéneo y común a todas las mediciones, tanto en lo relativo a la selección de equipos como a su ubicación y contextualización, con el fin de aumentar las garantías en las comparaciones realizadas con datos de distinta procedencia.

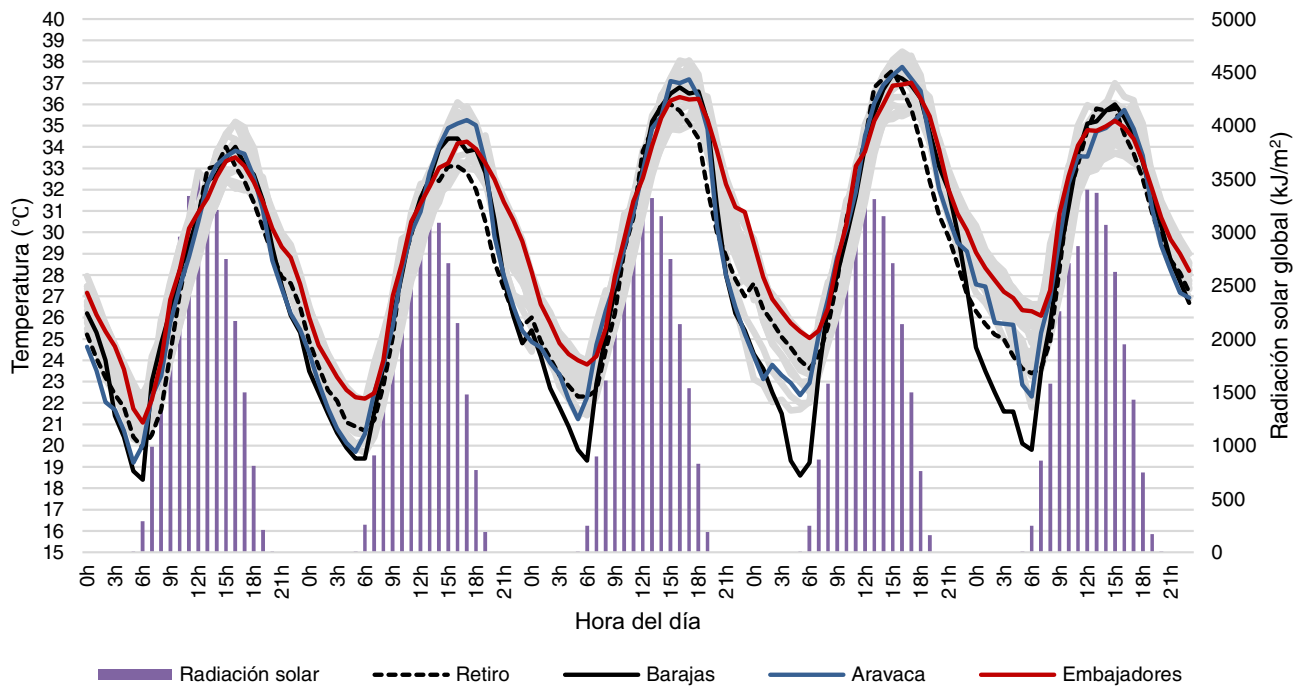


Figura 4. Evolución de las temperaturas a lo largo de 5 días en verano, entre el 31 de julio y el 3 de agosto de 2016

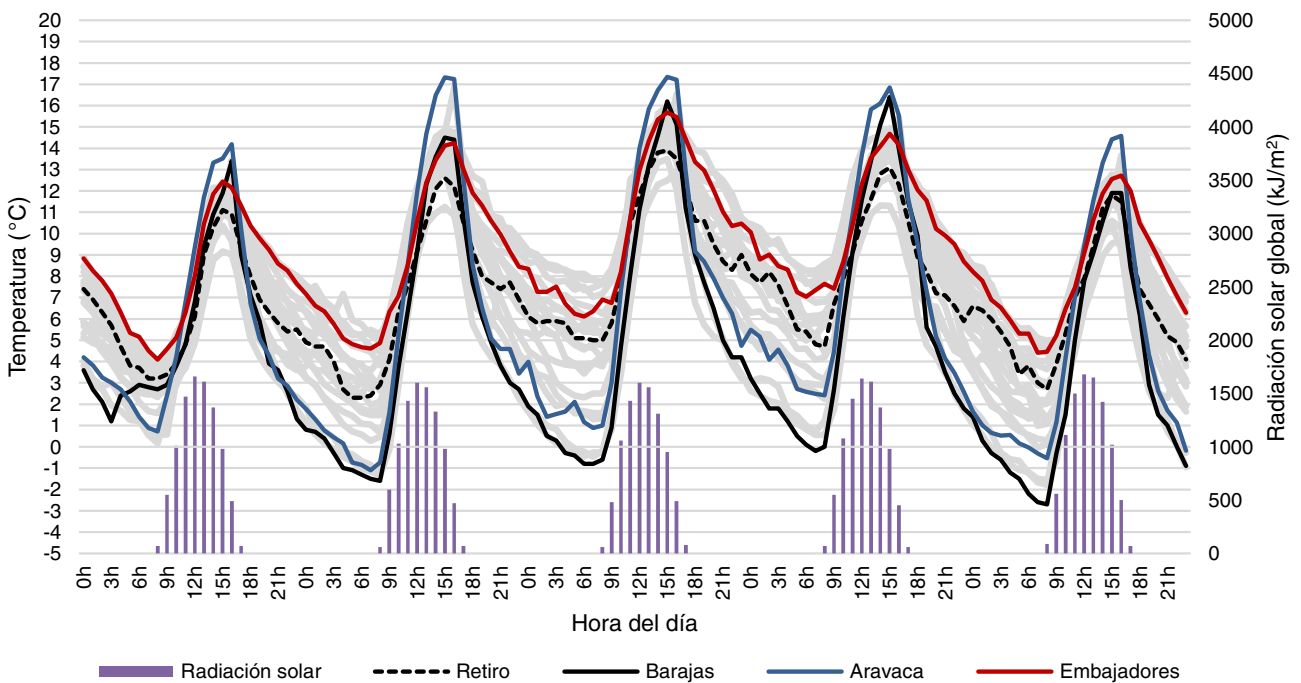


Figura 5. Evolución horaria de las temperaturas a lo largo de 5 días en invierno, entre el 25 y el 29 de diciembre de 2016



## 4. Conclusiones

La investigación llevada a cabo dentro del marco del proyecto MODIFICA tenía como objetivo la medición del clima urbano para la correcta caracterización de la isla de calor y poder así incorporar este fenómeno en la evaluación energética de los edificios. En este sentido, las diferentes campañas de monitorización llevadas a cabo a lo largo de este proyecto han resultado ser satisfactorias, tanto por la efectividad del desarrollo metodológico planteado como por la calidad de los datos recabados.

Se ha podido constatar la influencia que el crecimiento y la dispersión urbana sufrido en la ciudad de Madrid durante los últimos años ha tenido un impacto sobre la isla de calor, extendiéndose su efecto sobre una mayor parte del territorio. También se ha comprobado la interrelación de esta con los distintos tipos de tejidos urbanos existentes, lo cual debe tenerse en cuenta en la futura planificación urbana.

A través del análisis horario de la isla de calor, se ha constatado que las mayores diferencias de temperatura se producen durante las horas nocturnas llegando a registrarse diferencias entre los puntos más fríos y los más cálidos de hasta 6-7°C. También se ha constatado una dinámica horaria común a lo largo del año, encontrándose durante los meses fríos una isla de calor más constante, pero no más intensa, que la registrada durante los meses donde se registra mayor cantidad de radiación solar.

Avanzar en el conocimiento detallado del fenómeno de la isla de calor resulta, por tanto, fundamental para el correcto diseño de estrategias de refrigeración de los edificios. Su posición relativa dentro de la ciudad puede dificultar la adopción de determinadas estrategias bioclimáticas, como el aprovechamiento de la ventilación nocturna. Incorporar este fenómeno en la simulación puede ser, también, un elemento clave para mejorar la precisión de la simulación energética en entornos urbanos.

## 5. Bibliografía

- Almendros, M. Á., & López Gómez, A. (1995). La isla de calor en Madrid y las situaciones sinópticas. *Estudios Geográficos*, 56(219), 207–221.
- ESRI. (2016). ArcGIS Spatial Statistics Toolbox for ArcMap.
- Fernández García, F., Allende Álvarez, F., Rasilla Álvarez, D., Martilli, A., & Alcaide Muñoz, J. (2016). Estudio de detalle del clima urbano de Madrid. Madrid.
- Fernández García, F., & Galán, E. (1995). Clima y contaminación atmosférica en Madrid. *Estudios Geográficos*, 56(219), 263–284.
- López Gómez, A. (1985). El clima de las ciudades. *Arbor*, 121(474), 20.
- López Gómez, A., López Gómez, J., Fernández García, F., & Arroyo Ilera, F. (1988). El Clima urbano de Madrid: La isla de calor. Madrid: CSIC.
- Mirzaei, P. A. (2015). Recent challenges in modeling of urban heat island. *Sustainable Cities and Society*, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2015.04.001>
- Mirzaei, P. A., & Haghghat, F. (2010). Approaches to study Urban Heat Island – Abilities and limitations. *Building and Environment*, 45(10), 2192–2201. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.04.001>
- Muller, C. L., Chapman, L., Grimmond, C. S. B., Young, D. T., & Cai, X. (2013). Sensors and the city: A review of urban meteorological networks. *International Journal of Climatology*, 33(7), 1585–1600. <https://doi.org/10.1002/joc.3678>
- Núñez Peiró, M., Sánchez-Guevara, C., & Neila González, F. J. (2017). Update of the Urban Heat Island of Madrid and Its Influence on the Building's Energy Simulation. In *Sustainable Development and Renovation in Architecture, Urbanism and Engineering* (pp. 339–350). [https://doi.org/10.1007/978-3-319-51442-0\\_28](https://doi.org/10.1007/978-3-319-51442-0_28)
- Núñez Peiró, M., Sánchez-Guevara Sánchez, C., & Neila González, F. J. (2018). ES-2642617-B2. Spain.
- Palomino, I., Vivanco, M. G., Theobald, M., Garrido, J. L., & Martín, F. (2015). Evaluación de la calidad del aire en España utilizando modelización combinada con mediciones. Preevaluación 2014. Madrid.
- Salamanca, F., & Martilli, A. (2010). A new Building Energy Model coupled with an Urban Canopy Parameterization for urban climate simulations-part II. Validation with one dimension off-line simulations. *Theoretical and Applied Climatology*, 99(3–4), 345–356. <https://doi.org/10.1007/s00704-009-0143-8>
- Santamouris, M. (2007). Heat Island Research in Europe: The State of the Art. *Advances in Building Energy Research*, 1(1), 123–150. <https://doi.org/10.1080/17512549.2007.9687272>
- Santamouris, M. (2015). Regulating the damaged thermostat of the cities - Status, impacts and mitigation challenges. *Energy and Buildings*, 91, 43–56. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.01.027>
- Sobrino, J. A., Oltra-Carrió, R., Jiménez-Muñoz, J. C., Julien, Y., Sòria, G., Franch, B., & Mattar, C. (2012). Emissivity mapping over urban areas using a classification-based approach: Application to the Dual-use European Security IR Experiment (DESIREX). *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 18(1), 141–147. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2012.01.022>
- Stewart, I. D., & Oke, T. R. (2012). Local climate zones for urban temperature studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(12), 1879–1900. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1>
- WMO. (2017). Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation (WMO No. 8). World Meteorological Organization. Geneva, Switzerland. [https://library.wmo.int/doc\\_num.php?explnum\\_id=4147](https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=4147)

# Análisis energético de los edificios de la Universidad de Lleida

Cómo de lejos se está de los Edificios  
de consumo de energía casi nulo  
(nZEB)

SEMB. UNIVERSIDAD DE LLEIDA

Marc Medrano(1), Lidia Rincón, Albert Castell, Ingrid Martorell, Cristian Solé

(1) Doctor en Ingeniería Química. Profesor catedrático contratado. Sustainable Energy, Machinery and Buildings (SEMB) Research Group, INS-PIRES Research Centre, Universitat de Lleida, Pere de Cabrera s/n, 25001 Lleida, Spain  
Persona de contacto/Corresponding author: marc.medrano@udl.cat (Marc Medrano)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5734-6107> (M. Medrano)

## Análisis energético de los edificios de la Universidad de Lleida

### RESUMEN

Las universidades se enfrentan al desafío de adaptar los edificios del campus a edificios de energía casi nula (NZEB). En este estudio se presenta una metodología para evaluar el uso histórico de energía y la producción de energía renovable en todos los edificios universitarios. Este análisis es útil como línea de base para comparar con futuras reformas energéticas y permite determinar la brecha actual entre los indicadores de energía reales a nivel de edificio y de campus y los límites establecidos para los edificios no residenciales NZEB en la Unión Europea. La metodología se ha aplicado a la Universidad de Lleida. Los resultados muestran una amplia variación en el uso de energía entre los edificios del campus, que varían entre 50 y 470 kWh/m<sup>2</sup>/año y unos indicadores de energía primaria no renovable y de contribución de renovables muy alejados de los objetivos NZEB.

**Palabras clave:** consumo de energía; edificios universitarios; energías renovables; edificios de consumo de energía casi nulo.

## *Energy analysis of the University of Lleida buildings*

### ABSTRACT

*Universities face the challenge of adapting campus buildings to Near Zero Energy buildings (NZEB). This study presents a methodology to evaluate the historical use of energy and the production of renewable energy for all the buildings of a university. This analysis is useful as a baseline to compare with future energy retrofits and enables determining the current gap between actual energy indicators at building and campus levels and the established limits for NZEB non-residential buildings in the European Union. Results show a wide variation in energy use among campus buildings, ranging between 50 and 470 kWh/m<sup>2</sup>/year and indicators of non-renewable primary energy and contribution of renewables are far away from the NZEB targets.*

**Keywords:** *Energy consumption; University building; renewable energies; Nearly zero-energy Buildings.*

## 1. Introducción

El trabajo que presenta el grupo de investigación SEMB de la Universidad de Lleida (UdL) para el grupo de trabajo 4 (Barrios) de libro de Ponencias de la Jornada 2 de la Red Monitor se centra en el estudio del consumo y producción energética de los edificios de los cuatro campus de la UdL y en la propuesta de una metodología innovadora para ello. La referencia con la que se compararán los resultados obtenidos son los objetivos de edificios de balance energético casi cero (NZEB) de la Directiva 2010/31/UE relativa a la eficiencia energética de los edificios, EPBD [1].

La disponibilidad de datos de alta resolución sobre consumos eléctricos y sobre producción fotovoltaica, la carencia de análisis previos detallados, y el creciente interés mundial por una sociedad más sostenible y eficiente justificó este proyecto, que se vehiculó a través de una beca de introducción a la investigación y un TFM en el Máster de Ingeniería Industrial de la UdL [2]. También se publicó un artículo en revista científica [3].

Para dar contexto al estudio se consultó y analizó bibliografía en el ámbito de análisis y actuaciones energéticas en edificios o grupos de edificios existentes, no nuevos. En el ámbito no universitario algunos proyectos recientes demuestran los esfuerzos realizados para optimizar el uso de la energía a través de la renovación de edificios no residenciales existentes [4]; para evaluar las estrategias de renovación del edificio combinando el consumo de energía medido con los sistemas geográficos de información (SIG) [5]; y mejorar el diseño de nuevos edificios de oficinas de bajo consumo [6]. En cuanto a las universidades, es importante remarcar el rol ejemplar que juegan en las sociedades modernas; deberían ser emprendedoras en cuanto al análisis de la eficiencia energética y proponer la adaptación de medidas en sus propios edificios, orientados a NZEB, como mínimo para objetivos a medio plazo. Así pues, estas acciones deberían tener un papel importante en un objetivo más amplio para la sostenibilidad de los campus universitarios [7]. Finalmente, algunos estudios recientes sobre evaluaciones energéticas y auditorías han trabajado en esta dirección [8-9]. Sin embargo, se constata que los edificios universitarios no son una excepción, y en general

la mayoría de edificios existentes están por desgracia muy lejos de los requisitos NZEB.

## 2. Caso 1: Campus de la UdL

### 2.1. Objetivos

En este trabajo se presenta una metodología innovadora para evaluar el consumo histórico de energía y producción de energía renovable para los edificios de la UdL. Dicha metodología incluye compilación de las características geométricas y operativas de los edificios, así como el efecto de datos meteorológicos, y de uso y producción energética a nivel horario, diario y mensual.

Este análisis es útil como línea base para futuros trabajos, ya que permite determinar la brecha actual entre los indicadores de energía a nivel de edificio y campus con los límites establecidos para los edificios no residenciales NZEB en la Unión Europea. Asimismo, otra motivación del trabajo es usarlo como herramienta de concienciación a la comunidad universitaria y a sus equipos directivos.

### 2.2. Descripción de los campus UdL

La UdL es una universidad joven, de tamaño medio, creada en 1991, aunque sus raíces se remontan al año 1300, durante el reinado de Jaime II de Aragón. La UdL tiene cuatro campus repartidos por la ciudad (Fig. 1). El campus de Cappont (C1) es el campus universitario más nuevo, inaugurado en 1998. Está compuesto por el Edificio Transfronterizo (alberga la biblioteca del campus y otros servicios) (E1), un edificio de gestión académica (E2), un edificio de investigación (E3), la Escuela Politécnica Superior (E4), la Facultad de Derecho, Economía y Turismo (E5), la Facultad de Educación, Psicología y Trabajo Social (E6), y un aulario (E7). El campus del Rectorado (C2) tiene el Rectorado, los servicios generales y la Facultad de Letras. Construido en el siglo XIX, es el edificio histórico de la UdL. Fue reformado en 1991. El campus de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agraria (C3) se inauguró en 1972. Alberga varios servicios de investigación y enseñanza en las afueras del oeste de la ciudad. Finalmente, el Campus de Ciencias de la Salud (C4) se encuentra en

dos sitios. El primero es el Hospital Universitario Arnau de Vilanova, con la unidad docente de Ciencias de la Salud (E19) y el edificio de investigación de Biomedici-

na (E20), construido en 2012. El segundo es el Hospital de Santa María, con la Facultad de Medicina (E17) y la Facultad de Enfermería y Fisioterapia (E18).

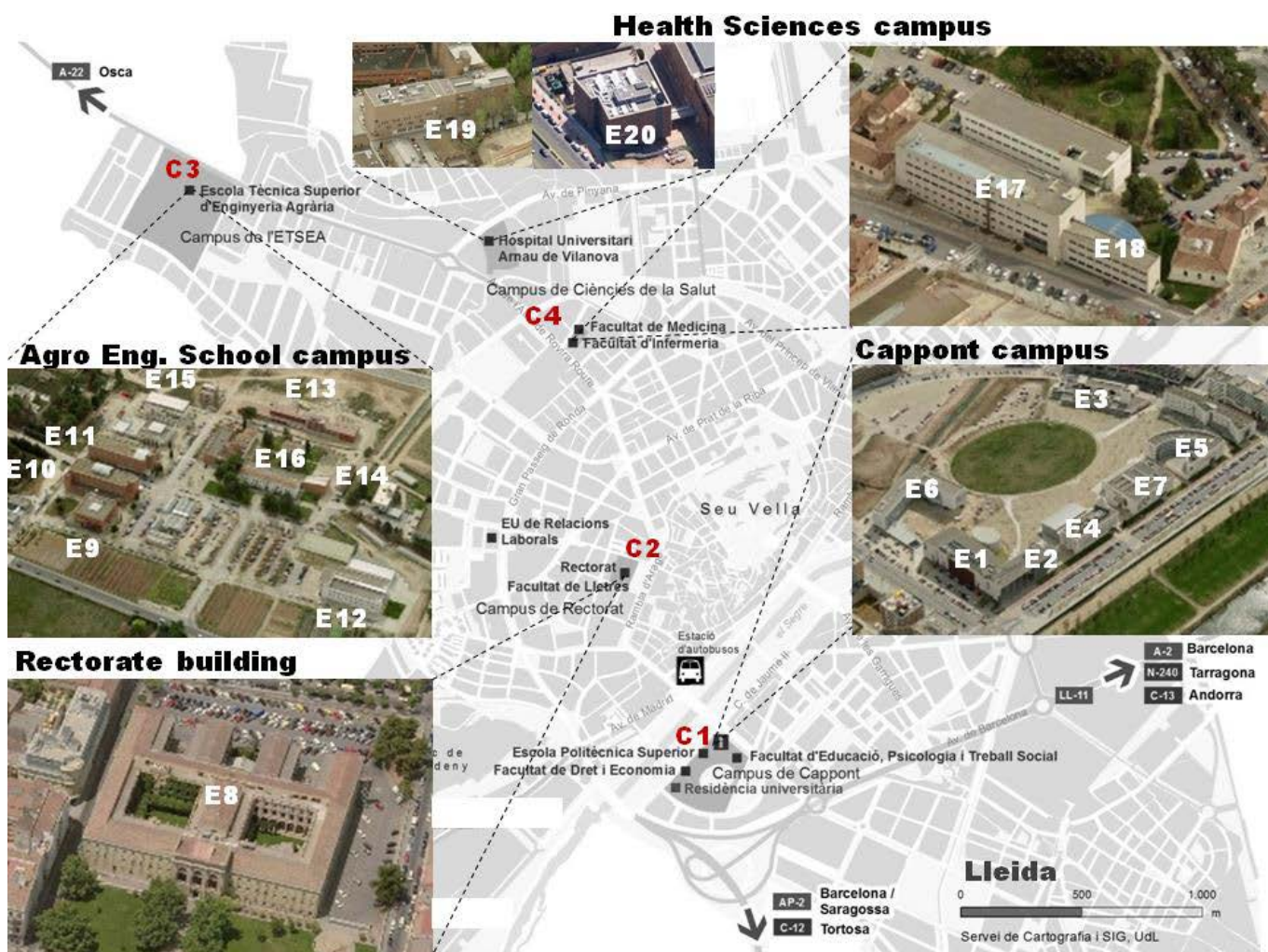


Figura 1: Localización de los campus en Lleida e identificación de los edificios

### 2.3. Compilación de datos

En primer lugar, se compilaron una serie de características para cada edificio, como son: ubicación, superficie construida, estimación de usuarios por edificio, sistemas de calefacción y refrigeración y presencia o no de placas fotovoltaicas en cubierta. Se observó que la mayoría de ellos usan enfriadoras de agua en verano y calderas de gas en invierno. Dos de ellos usan bombas de calor y un 40% tienen placas PV en la cubierta.

El consumo de gas y electricidad se ha compilado con la resolución de tiempo máxima disponible. En

el caso del gas sólo se dispone por ahora de facturas mensuales. Para la electricidad, un nuevo sistema de monitoreo permite obtener lecturas de energía cada 15 minutos. Los medidores de potencia instalados en cada edificio y los registradores de datos de cada edificio envían la información a los concentradores del campus, que a su vez transmiten todos los datos a un servidor general en la nube. Se puede acceder a este servidor a través de una plataforma en línea. Este software es llamado DEXCellEnergy Manager, de DEXMA Company. La producción de energía renovable también se monito-

riza cada hora desde el año 2010 y se ha incluido en este estudio. Todas las instalaciones fotovoltaicas existentes consisten en cinco sistemas PV policristalinos ubicados en dos campus diferentes, 2 en el Campus 1, potencias pico de 96,6 kW (en la cubierta E1) y 95,9 kW (E4); y los otros 3 en el Campus 3, con potencias nominales de 79,2 kW (en E9, E10 y E11), 47,95 kW (E12) y 95,9 kW (E13 y E14). Todos los módulos se montan en cubiertas planas, con soportes inclinados. Son módulos sin seguimiento, orientados al sur, en el rango 135 °–225 °, y con ángulos de inclinación entre 20 y 25 °, dependiendo del edificio. El área total de los módulos PV instalada es de 3029,1 m<sup>2</sup> con una potencia instalada total de 416,3 Wp. Los datos meteorológicos de temperatura ambiente y radiación solar se obtienen de la estación meteorológica ubicada en el campus de Cappont.

## 2.4. Metodología de análisis de datos

### Visión general anual

Se ha analizado el consumo anual de energía para gas, electricidad y la producción anual de fotovoltaica, a nivel de campus y de edificio. Además de los valores de consumo o generación reales, que pueden ser muy diferentes entre los edificios debido a su tamaño y actividad, se han generado y discutido gráficos normalizados, utilizando tanto el área construida como el número de usuarios para edificios como variables de referencia para normalizar.

Finalmente se identifican los consumidores más grandes, se generan figuras absolutas y normalizadas, y se discuten posibles motivos para describir el rendimiento observado.

### Análisis mensual de datos de gas

Para conseguir una mejor comprensión del uso del gas para la calefacción y otros usos posibles como la producción de agua caliente, se generan líneas de rendimiento para cada edificio mediante la teoría de grados-día. Los datos mensuales van del 2010 al 2017. Estas líneas de rendimiento son útiles para medir los ahorros derivados de las renovaciones de eficiencia energética e identificar y corregir problemas operativos y de mantenimiento. El consumo de gas estimado para un periodo de calefacción se puede calcular como (Fórmula 1):

$$[1] \quad F = \frac{24 \cdot \text{HLC} \cdot (\text{HDD})}{\eta} + B$$

donde,

F es el consumo de gas del periodo (kWh).

$\eta$  es la eficiencia del sistema de calefacción.

HLC es el coeficiente general de pérdida de calor del edificio (kW/K), que incluye las pérdidas de calor por conducción, la infiltración de aire y las pérdidas por ventilación.

B es un valor constante que corresponde a otros consumos de gas que no son dependientes de la climatología (kWh).

HDD suma de los grados día diarios para el periodo de facturación correspondiente a un mes (° C · día).

### Análisis horario de datos eléctricos

Se analizan 3 años de datos de electricidad (2015, 2016 y 2017) para todos los edificios de los 4 campus de la UdL, con una resolución temporal de una hora, utilizando el lenguaje de programación y el entorno de software R. En primer lugar se usan las potentes librerías de R para pre-procesar los datos, detectando “outliers” y rellenando datos que faltan. Los valores diarios de consumo de electricidad agregados se representan frente a la temperatura exterior diaria promedio para determinar la dependencia climática del uso de electricidad. Para los 18 edificios con calefacción de gas natural, se aplica un modelo de 4 parámetros de enfriamiento (4P) de ASHRAE [10]. Se usa el paquete “Segmented” de R para encontrar el “changepoint” en el análisis de regresión lineal para determinar los parámetros del modelo. Los días desocupados correspondientes al fin de semana y los periodos de vacaciones se eliminan antes de la regresión.

Para los dos edificios que usan electricidad tanto para calefacción y enfriamiento a través de bombas de calor, se aplica un modelo de 5 parámetros (5P) para tener en cuenta la dependencia del clima tanto en calefacción como en refrigeración.

### Brecha con los edificios NZEB

La evaluación de hasta qué punto los edificios de los campus de la UdL cumplen la definición NZEB se hace en base a los 4 requisitos propuestos en la norma EN ISO / DIS 52000-1. Dichos requisitos son 1) la calidad de la envolvente; 2) el consumo de energía primaria; 3) el uso de energía primaria no renovable; y 4) la energía primaria renovable y el balance NZEB global.

## 2.5. Resultados y discusión

En la Figura 2 se muestra el consumo energético total (electricidad + gas natural), normalizado por la superficie construida, con datos del año 2017, para todos los edificios de la UdL. Destacan claramente dos consumidores principales, los edificios E19 y E20 de Campus 4 de Ciencias de la Salud. La potencia adicional requerida en los laboratorios, un consumo continuado durante las 24 horas del día y otros equipos de investigación biológica, podrían explicar estos grandes consumos. El consumo medio anual energético es de 145 kWh/m<sup>2</sup>. Excluyendo los edificios E19 y E20, con valores por encima de los 300 kWh/m<sup>2</sup>, el resto de edificios de la UdL se sitúan entre 60 y 190 kWh/m<sup>2</sup>, comparables a los valores presentados por la Universidad Politécnica de Barcelona (UPC) para hasta sesenta edificios en diferentes campus, los cuales tienen unos consumos energéticos entre 40 y 200 kWh/m<sup>2</sup> el año [9]. Otro estudio para once edificios en un campus universitario en Corea muestra intensidades de consumo energético para gas y electricidad del mismo orden, situados en el rango de 106-399 kWh / m<sup>2</sup> al año [7].

En la Figura 3 se muestran las líneas de rendimiento de la calefacción para dos edificios con valores extremos de la pendiente en el campus de Cappont (Campus 1). Se puede observar que el edificio E3 dispone de más puntos que el E1. Esto es debido a que el edificio E1 dispone de datos de facturación de gas natural a partir del octubre de 2012, casi dos años menos que el edificio E3 y que el resto de edificios.

Se obtienen curvas similares para el resto de edificios. Los resultados de estos modelos de regresión lineal se resumen en la Tabla 1. Los edificios E2 y E15 no se incluyen en el análisis porque tienen sistemas eléctricos tanto para la calefacción como para la refrigeración.

Las desviaciones estándar de las pendientes (m) de las líneas de regresión obtenidas, están en el rango 3-6%. De este modo, las diferencias, casi del triple, observadas entre las líneas de rendimiento extremas de los edificios estudiados son estadísticamente significativas.

El análisis detallado horario de los perfiles de consumo eléctrico ha permitido identificar entre otros las horas valle y pico del día, los días de activación de los equipos de clima, los periodos festivos o la contribución de los fines de semana en el consumo semanal.

El porcentaje de consumo de electricidad en los fines de semana tiene un rango entre 10-25 %.

La Figura 4 ilustra el modelo lineal 4P resultante para los valores diarios de consumo eléctrico frente a la temperatura media externa diaria, para el edificio E8. La temperatura de cambio de tendencia (“change-point”) es de 18,04 °C. Para temperaturas superiores a esta temperatura base de refrigeración, hay una dependencia importante del consumo eléctrico diario con la temperatura exterior, principalmente asociada a las cargas de enfriamiento requeridas durante el verano. La dependencia para temperaturas inferiores es ocho veces más pequeña. Esto indica un aumento del consumo de iluminación durante los días de invierno y/o el uso de calentadores eléctricos en las oficinas para complementar la calefacción central con calderas de gas natural. Se ha observado que los edificios con una mayor pendiente en calefacción (datos de gas) coinciden también en refrigeración (datos eléctricos).

En la Figura 5 se muestra el consumo total de energía primaria calculado por cada edificio. Las líneas rojas horizontales representan el umbral máximo estimado para España. Como se puede ver, los edificios E2, E12, E15 y E18 tienen valores de energía primaria total cercanos al umbral máximo de 85-100 kWh/m<sup>2</sup>·año. También se puede observar que los edificios E19 y E20 del Campus 4, están muy lejos del concepto NZEB. Los otros 14 edificios analizados tienen energías primarias totales alrededor de 2,5-3 veces más altas que los umbrales máximos, siendo el promedio de la energía primaria total de todos los edificios analizados de 262,8 kWh/m<sup>2</sup>·año. Esto indica que se deben realizar muchas mejoras para alcanzar los objetivos NZEB.

En cuanto a la contribución de energía primaria renovable se observa un valor máximo de contribución in-situ de fuentes de energía renovable de 39,9% en el edificio E13, cerca del valor estimado de 45-55% para España en edificios nuevos. Los otros edificios con generación in-situ tienen aportaciones diversas entre el 3 y 15%. Se confirma pues que las cifras reales de energía están muy lejos de los futuros objetivos españoles del NZEB y se necesita una restauración de energía profunda si se desea que los edificios universitarios de España cumplan estos requisitos.



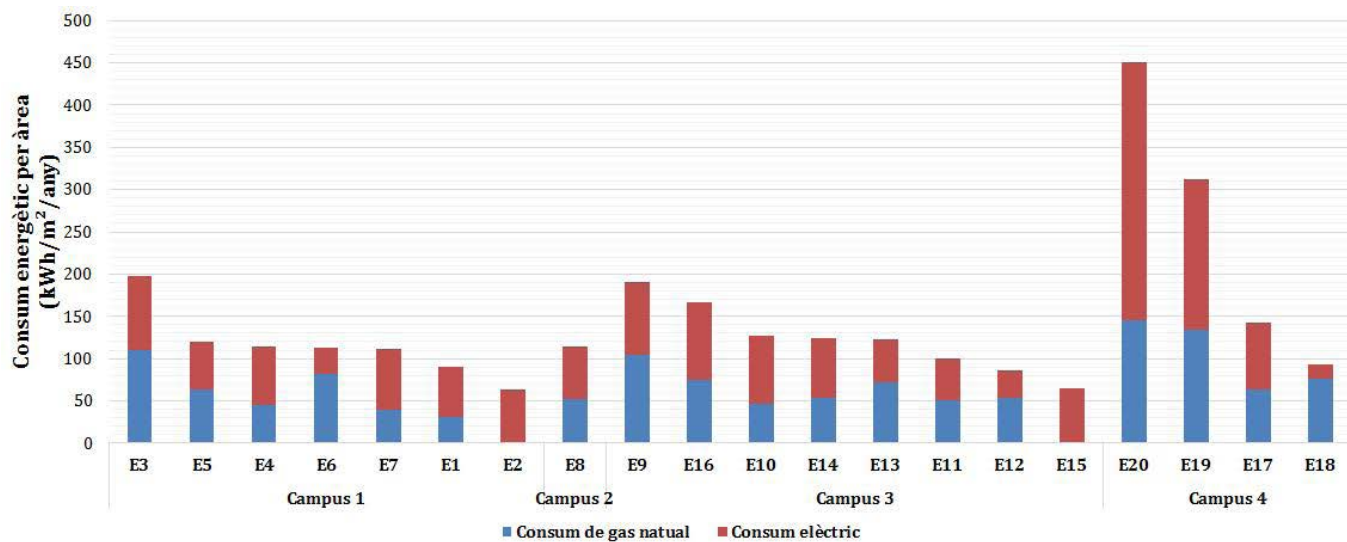


Figura 2: Consumo energético anual por superficie construida en 2017 en edificios de la UdL.

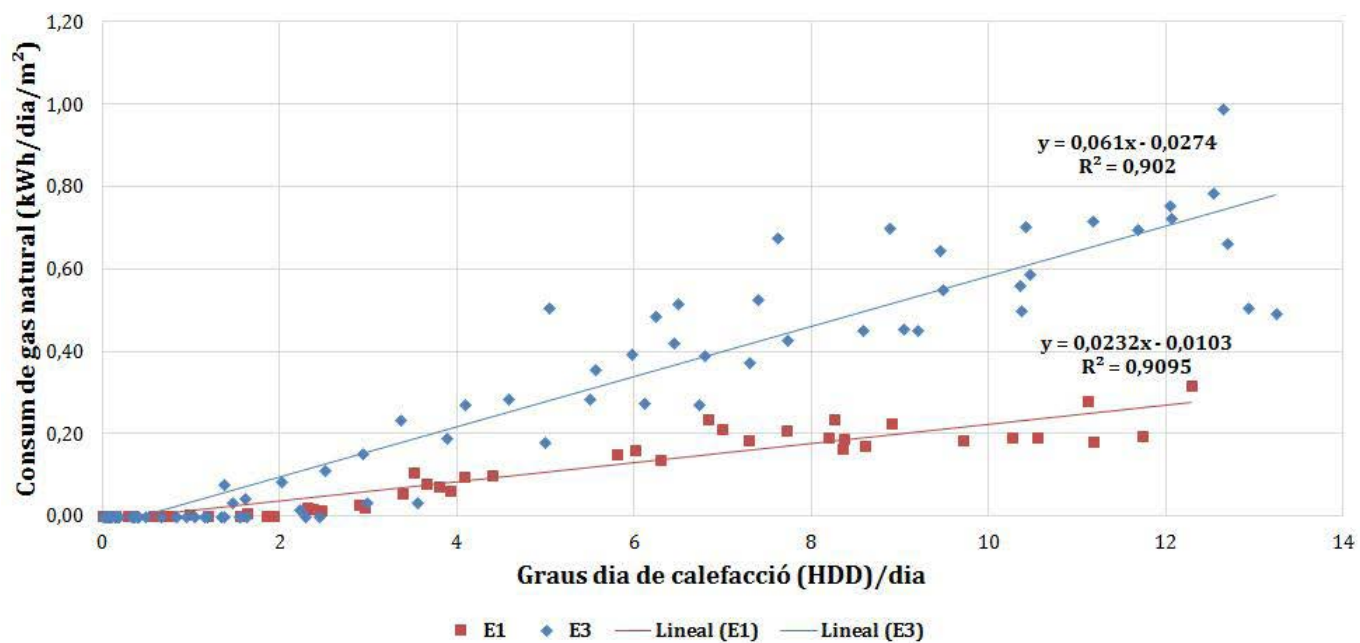


Figura 3: .Líneas de rendimiento de la calefacción para 2 edificios (E1 i E3) del Campus 1.

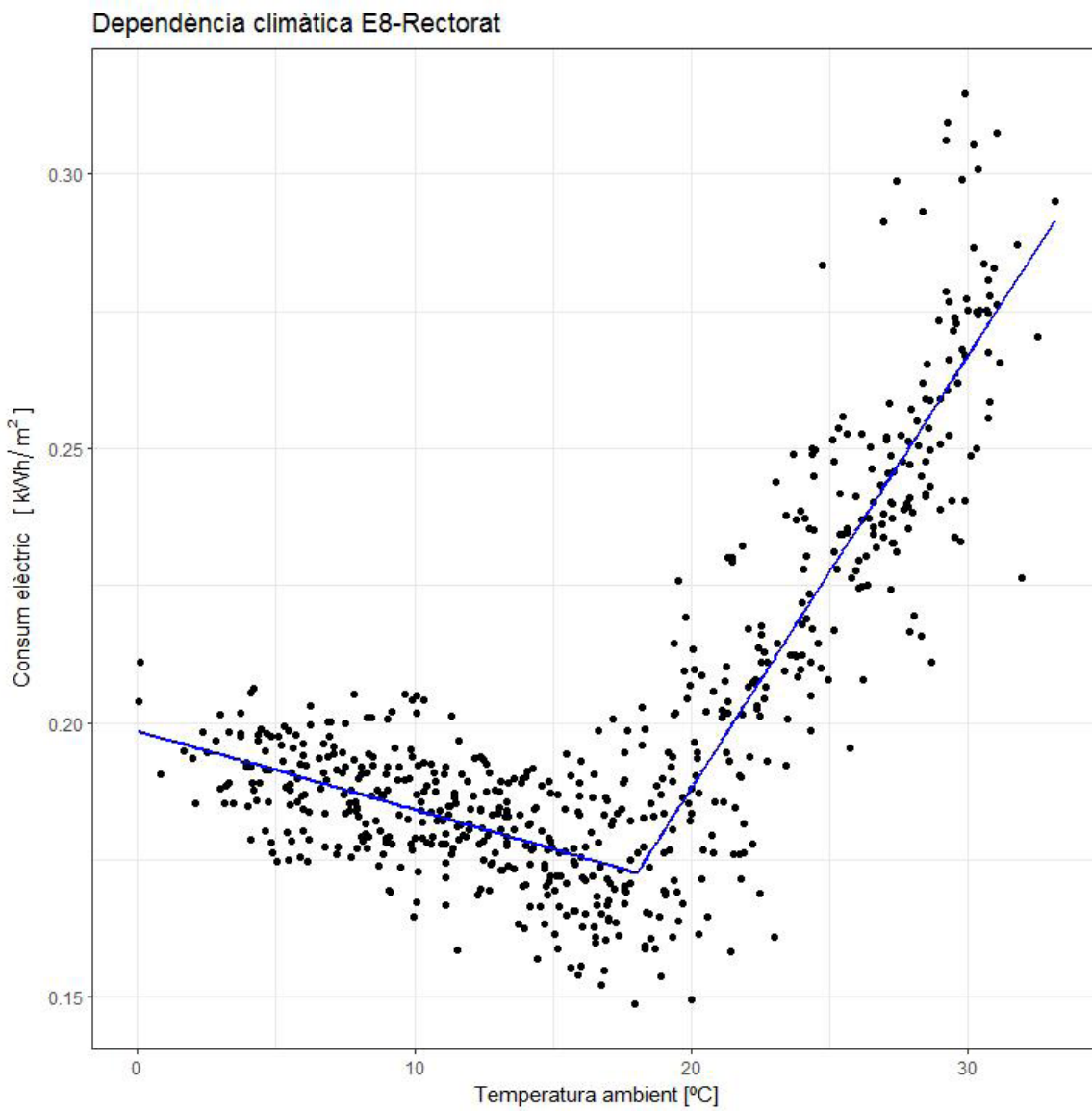


Figura 4: Regresión lineal del modelo 4P para el E8 en un periodo de 3 años.

Tabla 1: Parámetros de las líneas de rendimiento de la calefacción a partir de los usos de gas.

Campus	ID Edificio	Temperatura Base, $T_{hb}$ (°C)	Pendiente, $m$ (kWh/m <sup>2</sup> K día)	UH=HLC/A (W/m <sup>2</sup> K)	Punto de intercepción, $b$ (kWh/m <sup>2</sup> día)	R <sup>2</sup>
Campus 1	E1	16,5	0,023 ± 0,002	0,671 ± 0,05	-0,010	0,909
	E3	17,5	0,061 ± 0,04	1,779 ± 0,13	-0,027	0,902
	E4	15,5	0,037 ± 0,002	1,079 ± 0,07	-0,005	0,922
	E5	16,5	0,052 ± 0,004	1,517 ± 0,10	-0,016	0,913
	E6	19	0,032 ± 0,004	0,933 ± 0,11	-0,013	0,782
	E7	15	0,031 ± 0,002	0,904 ± 0,07	-0,006	0,897
Campus 2	E8	18	0,030± 0,002	0,875 ± 0,06	-0,015	0,897
Campus 3	E9	18	0,031 ± 0,003	1,050 ± 0,09	0,019	0,876
	E10	19	0,031 ± 0,003	0,904 ± 0,08	-0,003	0,780
	E11	19	0,030 ± 0,004	0,875 ± 0,10	-0,003	0,780
	E12	19	0,029 ± 0,003	0,846 ± 0,08	-0,014	0,849
	E13	18	0,017 ± 0,004	0,496 ± 0,11	0,032	0,502
	E14	19	0,032 ± 0,004	0,933 ± 0,12	-0,001	0,848
	E16	18	0,039 ± 0,004	1,138 ± 0,11	-0,012	0,837
Campus 4	E17	17	0,046 ± 0,004	1,342 ± 0,11	0,018	0,868
	E18	17,5	0,051 ± 0,003	1,488 ± 0,10	-0,019	0,917
	E19	19	0,053 ± 0,004	1,546 ± 0,12	0,051	0,888
	E20	18,5	0,064 ± 0,007	1,867 ± 0,21	0,02	0,826

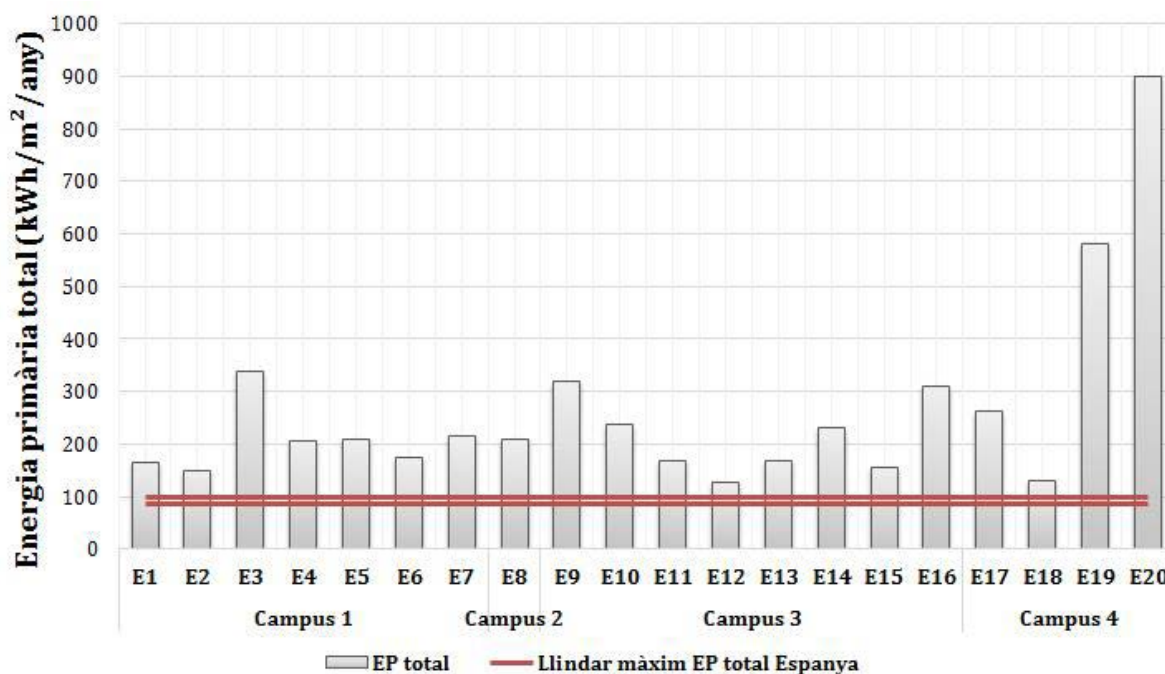


Figura 5: Energía primaria total por edificio y umbral máximo estimado.

## Bibliografía

- [1] Directiva 2012/27/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 25 de octubre de 2012, relativa a la eficiencia energética, por la que se modifican las Directivas 2009/125/CE y 2010/30/UE, y por la que se derogan las Directivas 2004/8/CE y 2006/32/CE Texto pertinente a efectos del EEE, p. 56.
- [2] Martí Puigvert, J.M. (2018). Anàlisi energètic en edificis de la UdL (Trabajo final de Master). Universitat de Lleida. <http://hdl.handle.net/10459.1/64718>
- [3] Medrano M., Martí, J.M., Rincón, L., Mor, G., Cipriano, J., Farid, M. (2018). Assessing the nearly zero-energy building gap in university campuses with a feature extraction methodology applied to a case study in Spain. *International Journal of Energy and Environmental Engineering* 9 (3), 227-247.
- [4] D'Agostino, D., Zangheri, P. y Castellazzi L. (2017). Towards Nearly Zero Energy Buildings in Europe: A Focus on Retrofit in Non-Residential Buildings, *Energies*, vol. 10, núm. 1, p. 117.
- [5] Delmastro, C., Mutani, G. y Schranz, L. (2016). The evaluation of buildings energy consumption and the optimization of district heating networks: a GIS-based model. *Int. J. Energy Environ. Eng.*, vol. 7, núm. 3, p. 343-351.
- [6] Flodberg, K., Blomsterberg, Å. y Dubois, M.C. (2012). Low-energy office buildings using existing technology: simulations with low internal heat gains. *Int. J. Energy Environ. Eng.*, vol. 3, núm. 1, p. 19.
- [7] IARU Green Guide for Universities | Sustainability & Energy. [En línea]. Disponible en: <https://sustainability.berkeley.edu/news/iaru-green-guide-universities>. [Consulta: 14-maig-2018].
- [8] Chung, M.H. y Rhee, E.K. (2014) Potential opportunities for energy conservation in existing buildings on university campus: A field survey in Korea. *Energy Build.*, vol. 78, p. 176-182.
- [9] Mata, E. López, F. y Cuchí, A. (2009) Optimization of the management of building stocks: an example of the application of managing heating systems in university buildings in Spain. *Energy Build.*, vol. 41, núm. 12, p. 1334-1346.
- [10] Perez, K.X., Cetin, K., Baldea, M., Edgar, T.F. (2017) Development and analysis of residential change-point models from smart meter data. *Energy Build* (2017). <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778816320795>. Accessed 22 Mar 2017.

# Monitorización para el desarrollo de modelos predictivos a escala urbana

Barriadas de vivienda social en Andalucía

TEP 130. UNIVERSIDAD DE SEVILLA (US)

**R. Escandón (1), R. Suárez (2), A.L. León-Rodríguez (3), A. Alonso (4), C.M. Calama-González (5)**

(1) Dra. Arquitecto. IUACC, E.T,S, de Arquitectura, Universidad de Sevilla, Sevilla (España)

(2) Dr. Arquitecto. Profesor titular. IUACC, E.T,S, de Arquitectura, Universidad de Sevilla, Sevilla (España)

(3) Dr. Arquitecto. Profesor titular. IUACC, E.T,S, de Arquitectura, Universidad de Sevilla, Sevilla (España)

(4) Dra. Arquitecto. IUACC, E.T,S, de Arquitectura, Universidad de Sevilla, Sevilla (España)

(5) Arquitecto. IUACC, E.T,S, de Arquitectura, Universidad de Sevilla, Sevilla (España)

Persona de contacto/Correspondingauthor:rsuarez@us.es (R. Suárez)

ORCID:<http://orcid.org/0000-0003-0531-698X> (R. Escandón); <http://orcid.org/0000-0001-6136-1596> (R. Suárez); <http://orcid.org/0000-0003-3466-7850> (A.L. León-Rodríguez); <https://orcid.org/0000-0002-0321-1730> (A. Alonso); <http://orcid.org/0000-0002-6511-2885>(C.M. Calama-González)

## Monitorización para el desarrollo de modelos predictivos a escala urbana. Barriadas de vivienda social en Andalucía

### RESUMEN

La rehabilitación del parque residencial existente es una de las principales prioridades de las actuales políticas en materia de energía, dado el nivel de obsolescencia energética que este presenta. Esta rehabilitación energética debe hacer frente tanto al reto social que supone la pobreza energética, como al reto climático del constatado calentamiento global. Para la toma de decisiones y propuesta optimizada de medidas de rehabilitación integral a nivel urbano, resulta imprescindible tomar como punto de partida una caracterización realista de su actual comportamiento ambiental. Este trabajo expone la metodología de monitorización aplicada en diferentes barriadas de vivienda social de Andalucía, con el objetivo final de desarrollar modelos predictivos a gran escala de la demanda energética, emisiones de CO<sub>2</sub>, calificación energética, nivel de estanqueidad al aire y grado de confort térmico.

**Palabras clave:** comportamiento energético; confort térmico; calidad de aire interior; modelo predictivo.

## *Monitoring for the development of predictive models on an urban scale. Social housing neighbourhoods in Andalusia*

### ABSTRACT

*The retrofitting of the residential stock is one of the main priorities of current energy policies, given its level of energy obsolescence. This energy retrofitting must face both the social challenge posed by energy poverty and the climatic challenge of the proven global warming. For decision-making and an optimized proposal of comprehensive retrofitting measures at an urban level, it is essential to take as a starting point a realistic characterization of its current environmental behaviour. This work presents the monitoring methodology applied in different social housing neighbourhoods in Andalusia, with the final aim of developing large-scale predictive models of energy demand, CO<sub>2</sub> emissions, energy rating, level of airtightness and thermal comfort.*

**Keywords:** *energy behaviour; thermal comfort; indoor air quality; predictive model.*

## 1. Introducción

Las administraciones públicas y sus actuales políticas energéticas son conscientes de que, para reducir significativamente el consumo y cumplir los objetivos establecidos por la Unión Europea para 2030 y 2050, ha de incidirse necesariamente en la rehabilitación energética del parque residencial existente. En el sur de España, existe un gran porcentaje de este parque de viviendas con un alto índice de vulnerabilidad social y energética, dadas las condiciones económicas y las bajas prestaciones térmicas de su envolvente (1). La actual situación de pobreza energética del sector de la vivienda social se verá agravada por el aumento de las temperaturas, consecuencia del cambio climático, lo que supondrá una clara amenaza para la salud de las personas.

Numerosas investigaciones demuestran la necesidad de llevar a cabo una caracterización constructiva y del uso de la energía antes de definir las estrategias de rehabilitación (2). Este paso inicial permite reducir notablemente las habituales diferencias entre el ahorro de energía estimado y el real tras el proceso de rehabilitación (3), que se dan cuando se aplican medidas de rehabilitación generalizadas que no se basan en simulaciones de modelos energéticos previamente calibrados. Además, esta caracterización debería tener en cuenta la perspectiva climática a largo plazo, para garantizar que los proyectos de rehabilitación basados en ella no se queden obsoletos antes de que su inversión haya sido amortizada.

Además, en el caso de la vivienda social, la posible renuncia de los usuarios a vivir en condiciones de confort térmico, debido a cuestiones económicas, aumenta el desequilibrio entre consumos reales y estimados. Por ello, la caracterización de este parque residencial no sólo debe abordar los ensayos pertinentes para la identificación de las características constructivas, sino que debe incluir métodos que garanticen la identificación de patrones reales de uso de las viviendas (4). Esto es posible a través de la combinación del análisis de datos cuantitativos medidos in-situ y datos cualitativos de encuestas a los usuarios.

El principal objetivo de este trabajo es exponer la metodología de monitorización aplicada por el grupo de investigación TEP-130 "Arquitectura, Patrimonio y Sos-

tenibilidad: Acústica, Iluminación, Óptica y Energía" (5) en diferentes barriadas de vivienda social de Andalucía. Esta metodología se ha desarrollado en los proyectos I+D+i: Eficacia: Reducción del consumo energético y del impacto ambiental en la construcción de viviendas protegidas en Andalucía (Ref. 07161D1A) (2007-2009), financiado por la Corporación Tecnológica de Andalucía y por la Empresa Municipal de la Vivienda de Sevilla (EMVISESA); el proyecto del Plan Estatal REFAVIV: Rehabilitación energética de las fachadas de viviendas sociales deterioradas aplicando productos innovadores nacionales (DIT) y europeos (DITE) (Ref. BIA-2012-39020-C02-01) (2013-2015); "Intervención en barriadas residenciales obsoletas: Manual de Buenas Prácticas" (2013-2015) (G-GI3001/IDIH), financiado por la Agencia de Obra Pública de la Junta de Andalucía (Consejería de Fomento y Vivienda, Junta de Andalucía) y Fondos FEDER; "re-HABITAR patrimonio contemporáneo y tecnología. Proyecto de actualización tecnológica del patrimonio contemporáneo: vivienda social del movimiento moderno" (2016-2018) (PI12/3004) (6), financiado por la Consejería de Economía y Conocimiento de la Junta de Andalucía; así como en varias tesis doctorales desarrolladas dentro del seno de este grupo.

Los datos recopilados mediante esta metodología, han permitido el desarrollo de modelos predictivos a gran escala de la demanda energética, emisiones de CO<sub>2</sub>, calificación energética, nivel de estanqueidad al aire y grado de confort térmico. Estas herramientas de predicción resultan fundamentales en el proceso de actualización energética del parque residencial, tanto en la fase de toma de decisiones como para la propuesta optimizada de medidas de rehabilitación integral a nivel urbano.

## 2. Sistemas y protocolos de monitorización

La metodología empleada se centra en la evaluación ambiental y energética del parque de vivienda social existente de las zonas climáticas más representativas de la región andaluza A3, A4, B4, C3 y C4 para las distintas tipologías edificatorias de vivienda social. Para ello se abordan las siguientes tareas:

- Configuración tipológica y constructiva: identificando las principales tipologías y caracterizando los elementos constructivos.
- Monitorización de variables ambientales: caracterizando el comportamiento ambiental (temperatura, humedad relativa y calidad del aire interior), las condiciones de confort térmico y el consumo energético.
- Caracterización de los perfiles de uso y ocupación.

## 2.1. Configuración tipológica y constructiva

### 2.1.1. Identificación tipológica

En primer lugar, se realiza una identificación y caracterización tipológica del parque residencial construido a escala urbana (7). Para ello, se define el marco histórico y urbanístico del núcleo urbano objeto de estudio y se identifican las barriadas y promociones de viviendas (Figura 1) construidas fundamentalmente en dos periodos de estudio: 1940 – 1980, previo a la aplicación de la NBE CT-79, y 1980 – 2006, antes de la aplicación del CTE. Se establece un límite mínimo de 50 viviendas por promoción, ya que se pretende considerar únicamente promociones de vivienda con entidad relevante.



Figura 1. Barriada social San Pablo (Sevilla).

Una vez identificadas las promociones de viviendas, se genera una base de datos que recoge información general relativa a las promociones y de cada uno de los bloques de viviendas que conforman la promoción. Dicha información es obtenida de fuentes de información de acceso abierto: Sede General del Catastro y Google Maps; o de fuentes de la administración pública mediante Informes de Evaluación de Edificios. Asimismo,

a nivel urbano, se genera un Sistema de Información Geográfica (SIG) que incorpora toda la documentación recopilada de las promociones de vivienda. Se ha utilizado un software libre, QGIS 2.18.4, lo que permite una mayor facilidad de acceso a la información y a su lectura y análisis.

### 2.1.2. Caracterización constructiva

Para llevar a cabo la caracterización y análisis de los elementos constructivos del parque residencial existente, se plantea una recopilación documental del proyecto original de cada promoción de viviendas, consultando diferentes archivos históricos y fuentes bibliográficas. Posteriormente se lleva a cabo una identificación y caracterización de los sistemas constructivos, analizando aspectos relacionados con las soluciones constructivas de su envolvente térmica. Toda la información recopilada de los proyectos originales se incorpora al SIG desarrollado, ampliando con ello la capacidad de análisis estadístico de esta plataforma.

Esta información proporciona datos teóricos que deben ser contrastados mediante inspecciones visuales y ensayos in-situ. Para ello se llevan a cabo tareas de monitorización a largo plazo y ensayos puntuales para la caracterización constructiva de la envolvente (8).

Para determinar la transmitancia térmica ( $U$ ) de los cerramientos, se lleva a cabo un ensayo de temperaturas, de acuerdo con la normativa UNE EN ISO 6946, que permite obtener el flujo de calor a través de la superficie medida. Para ello, se toman medidas de una sonda inalámbrica de temperatura en la superficie exterior del cerramiento (modelo TESTO 0602 0394) (Tabla 1), de tres termopares adheridos a la superficie interior del cerramiento (modelo TESTO 0614 1635) (Tabla 1) y de una sonda de temperatura ambiente interior (definida en el apartado 2.2.1). Con ello, el equipo Medidor multifunción TESTO 435-3 procesa los datos y calcula el valor de  $U$  ( $W/m^2K$ ) para esa zona del cerramiento. Estos ensayos, se realizan tanto en verano como en invierno.

Además, para la búsqueda de patrones de comportamiento térmico de las fachadas, se realizan ensayos de termografía infrarroja mediante una cámara ThermoCAM B4 FLIR (Figura 2), de acuerdo con la normativa UNE EN 13187, tanto en periodo estival como invernal.

Para determinar el grado de estanqueidad al aire de la envolvente exterior de las viviendas, se realizan



test de despresurización mediante un equipo Blower-Door (Figura 2), de acuerdo con la normativa UNE EN 13829. Se ha realizado este ensayo de estanqueidad al aire en más de 200 viviendas sociales en Andalucía (9), abordando las zonas climáticas más representativas y los periodos de estudio 1950-1980 y 1980-2006. Estos ensayos, se combinan con el análisis termográfico y el uso de trazadores de humos, para localizar las vías de entrada de aire y determinar la evolución temporal de las pérdidas de calor producidas por estas vías de infiltración. Se realiza un primer ensayo dejando abiertas todas las puertas interiores de la vivienda, y otro sellando las puertas de baños y cocina, para descartar la entrada/salida de aire a través de elementos puntuales como la campana extractora o los conductos de ventilación.

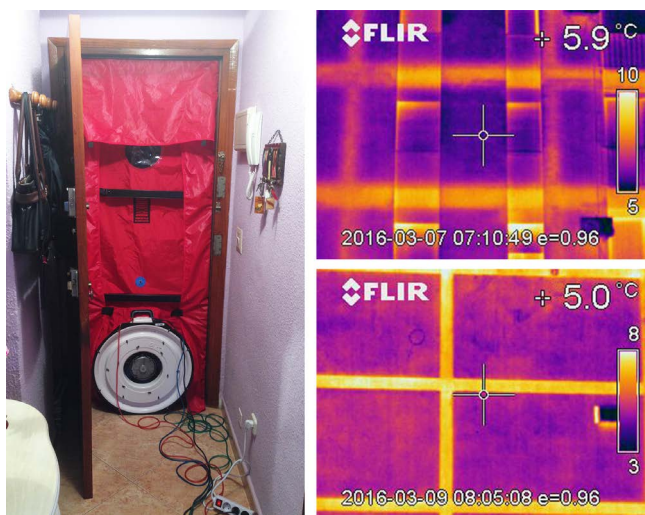


Figura 2. Ensayo de estanqueidad y de termografía infrarroja.

## 2.2. Monitorización de variables ambientales

El primer paso para la caracterización del comportamiento ambiental y energético, en condiciones reales de uso, es la monitorización de las siguientes variables:

- Calidad ambiental interior: temperaturas interiores, humedad relativa, concentración de CO<sub>2</sub>.
- Condiciones de uso: detector de presencia y apertura de persianas.
- Eficiencia energética: consumo eléctrico (general y pormenorizado).
- Condiciones exteriores: temperatura del aire y humedad relativa.

El diseño del sistema de monitorización viene condicionado por el régimen de propiedad de las viviendas, por lo que se han empleado dos sistemas: uno integrado y otro local.

### 2.2.1. Sistema integrado de monitorización

En el proyecto Eficacia, las viviendas monitorizadas estaban en régimen de alquiler siendo la propiedad de una Empresa Municipal de Vivienda de Sevilla, lo que facilitó la implementación de un sistema integrado de equipos de medida. En este caso, con ayuda de un sistema de control y monitorización integral multi-paramétrico denominado Metasys® (Figura 3), comercializado por Johnson Controls, se gestionaron y recopilaban todas las medidas de las variables medioambientales, consumos energéticos y variables sobre las condiciones de uso de las viviendas. Los datos eran registrados por data loggers que transmitían las señales digitales a un motor de automatización de red (NAE). El software propio que incorpora este NAE permite configurar y programar todas las sondas conectadas a él, así como procesar, visualizar y descargar los datos medidos en un ordenador central, a través de una plataforma web. Los datos se descargaban en formato CSV, para su posterior análisis y tratamiento en Microsoft Excel.

El proceso de monitorización completo se desarrolló a lo largo de más de dos años, con un primer año de puesta en marcha y evaluación del sistema y un segundo año de análisis. Este periodo se prolongó posteriormente durante otros dos años, mediante la formalización del proyecto AMEC (Ampliación Monitorización Edificio Cros-Pirotecnica), financiado por la Empresa Municipal de la Vivienda de Sevilla.

En concreto, la monitorización interior de las variables medioambientales decada vivienda, consistió en: registros de temperatura ambiente mediante dos sondas de temperatura, una en la zona de día y otra en la zona de noche; registros de temperatura en los cerramientos mediante sondas de temperatura tanto en la cara interior como en la exterior de cerramientos y cubiertas, con el fin de poder valorar su inercia térmica; registros de humedad en el ambiente mediante dos sondas de humedad relativa, una en la zona de día y otra en la zona de noche; registros de la calidad del aire mediante sonda de CO<sub>2</sub>; y registros de velocidad y caudal del aire en los conductos de ventilación. Para la deter-

minación de los consumos energéticos, se instalaron en cada vivienda dos contadores de energía eléctrica, uno del consumo total y otro para discriminar el consumo eléctrico de los equipos de climatización, así como un contador de consumo de agua caliente sanitaria y una sonda de temperatura de agua caliente sanitaria (ACS).

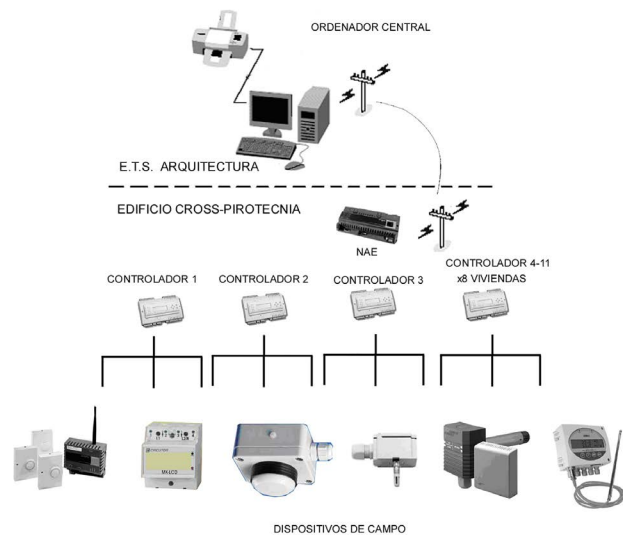


Figura 3. Sistema integral de simulación. Esquema del sistema de red Metasys®.

Además, se instalaron otros dispositivos que registran el comportamiento de los usuarios, para determinar las conductas reales de los mismos y su incidencia en las variables medioambientales y en los consumos energéticos. Estos son: detectores de presencia, tanto en la zona de día como en la de noche, y contactores de ventana para conocer cuándo estaban abiertas, lo que incide notablemente sobre la ventilación de la vivienda y, en consecuencia, sobre todas sus variables medioambientales. En la Figura 4 se detalla el esquema de la instalación en una de las viviendas objeto de la monitorización, y en la Tabla 2 se describen las principales características de las sondas utilizadas.

Para la monitorización de las variables medioambientales exteriores, se instaló una estación meteorológica, compuesta por: una sonda de temperatura de ambiente exterior en cada orientación del edificio, protegidas de la radiación solar; dos sondas de humedad relativa exterior (norte y sur); una sonda ambiente de CO<sub>2</sub> para determinar la calidad del aire exterior; una sonda de velocidad del viento y una sonda de radiación solar (Tabla 3).



Figura 4. Esquema del sistema de monitorización de una vivienda.

### 2.2.2. Sistema local de monitorización

La solución más habitual es un sistema local, empleado en viviendas en propiedad o en alquiler individualizado (10) ya que se limita la complejidad de disponer un sistema integrado de monitorización.

En estos casos, el protocolo diseñado plantea el uso de dos data loggers de interior WOHLER CDL 210, uno colocado en salón y otro en el dormitorio principal de la vivienda, midiendo las variables de temperatura, humedad relativa y concentración de CO<sub>2</sub> cada 30 minutos a lo largo de un año completo. Estos datos se descargan en formato CSV, para su posterior análisis y tratamiento en Microsoft Excel. Para la monitorización del consumo pormenorizado de energía, se dispone un Kit CurrentCost Envir, que se compone de un medidor de consumo general, localizado en el cuadro eléctrico, y varios medidores individuales en las tomas de enchufe de los equipos domésticos (fundamentalmente equipos locales de calefacción y/o refrigeración). La medida del consumo en kWh se registra cada 15 minutos, a lo largo de un año. El sistema CurrentCost Envir cuenta con una plataforma web que permite visualizar gráficamente y descargar de forma remota los datos medidos en formato XLS, para su posterior análisis y tratamiento en Microsoft Excel. En la Figura 5 se ilustra este sistema local de monitorización, y en la Tabla 4 se describen las principales características de los equipos utilizados.

Para el análisis de las variables ambientales exteriores, se hace uso de los datos cedidos por las estaciones meteorológicas de la Agencia Estatal de Meteorología

de España (temperatura, humedad relativa, radiación solar, velocidad y dirección del viento y precipitaciones), una vez verificada su idoneidad tras mediciones puntuales in situ de comprobación. AEMET proporciona los datos en formato TXT, y estos serán posteriormente tratados en Microsoft Excel y convertidos en archivos EPW para poder incorporarlos en las bases de datos climáticos de los programas de simulación energética.



Figura 5. Sistema local de simulación. Situación equipos de monitorización de variables ambientales y energéticas.

### 2.3. Caracterización de perfiles de uso

A partir de los datos de monitorización (temperatura del aire interior, concentración de CO<sub>2</sub>, consumo eléctrico, presencia y apertura de ventanas), es posible extraer información relevante sobre el modo de uso real de las viviendas. Sin embargo, estos datos deben complementarse mediante la realización de encuestas a los usuarios de las viviendas sobre sus hábitos de uso.

Como los patrones de uso y ocupación difieren significativamente a lo largo del año, se confeccionan encuestas particulares para el periodo de invierno y verano, obteniéndose más de 2 centenares de respuestas. Para que la respuesta de los usuarios se corresponda fielmente con sus hábitos de uso, estas deben completarse dentro del propio periodo. Las encuestas contienen los siguientes apartados: datos de la unidad familiar, ocupación media diaria, tiempo de utilización de los equipos (TV, ordenador, cocina...), tiempo y temperatura de uso de los equipos de calefacción y refrigeración, y hábitos de ventilación.

## 3. Evaluación de resultados a escala urbana

A partir de las fases de caracterización y monitorización de las barriadas descritas en los apartados anteriores, es posible desarrollar una valoración energética a escala urbana aplicando diferentes técnicas.

### 3.1. Herramientas de simulación oficiales con resultados asociados a un SIG

La evaluación y calificación energética mediante un procedimiento simplificado con herramientas oficiales como CE3X, permite obtener valores estimados de demanda de calefacción, refrigeración y global. La información generada, incorporada a una plataforma SIG, ofrece la potencialidad de mostrar visualmente una información a escala urbana del parque residencial existente, tanto desde el punto de vista tipológico y constructivo, como a nivel energético (11).

### 3.2. Modelos predictivos estadísticos

Los datos obtenidos en la monitorización permiten el desarrollo de modelos predictivos a escala urbana para la evaluación energética del parque de viviendas sociales. Estos modelos se desarrollan a partir de la técnica de regresión lineal múltiple, utilizando el software IBM SPSS Statistics 24 y Statgraphics X64, y permiten predecir la demanda energética, niveles de emisión de CO<sub>2</sub> y calificación energética. La entrada de datos es simple: tipología, posición del bloque, número de plantas, superficie ocupada y número de viviendas en planta baja, datos que pueden ser obtenidos fácilmente de la Sede Electrónica del Catastro (12).

Del mismo modo, la caracterización del nivel de estanqueidad al aire de una muestra significativa de viviendas, ha permitido el desarrollo de un modelo predictivo de la tasa de infiltración en viviendas sociales de las principales zonas climáticas de Andalucía (13). Este modelo puede ser de gran utilidad para los técnicos que traten de evaluar el comportamiento energético de parques residenciales existentes, dada la complejidad de medida de esta variable y su gran influencia en el comportamiento térmico.

### 3.3. Modelos predictivos numéricos

El análisis de los datos ambientales monitorizados y los perfiles de uso, permiten realizar una evaluación exhaustiva del nivel de confort térmico adaptativo en el interior de las viviendas, así como el desarrollo de modelos energéticos de simulación calibrados. A través de la combinación de herramientas de simulación energética como EnergyPlus y herramientas matemáticas como MATLAB, es posible desarrollar modelos paramétricos representativos de cada tipología y zona climática que caractericen, a gran escala, el nivel de confort térmico (14). A partir de los datos de caracterización recopilados en grandes muestras urbanas, se establecen los rangos de variabilidad de los parámetros característicos (geométricos, de la envolvente y del usuario), y aplicando la técnica estadística de muestreo de Hiper-cubo Latino se genera una muestra de estudio que garantice la representatividad de los resultados. MATLAB posibilita el lanzamiento automático de la simulación de esta muestra completa en EnergyPlus.

Con los resultados obtenidos, se lleva a cabo un análisis de sensibilidad para evaluar qué parámetros tienen mayor influencia en el confort térmico (14). Los resultados para una muestra de 500 casos construidos en Sevilla antes de 1980 concluyen que los parámetros más influyentes son los que definen el perfil de uso, fundamentalmente la tasa de ventilación natural y la densidad de ocupación. Con respecto a la geometría, los parámetros más influyentes en el confort son el factor de forma, el área de cada planta, y la orientación.

Además, esta gran muestra de casos de estudio simulados sirve como base de entrenamiento para modelos subrogados, que son una herramienta muy rápida de simulación cuando se trata de analizar grandes muestras de estudio. A partir de la muestra anteriormente mencionada, fue posible desarrollar una Red Neuronal Artificial que, a partir de 18 parámetros característicos del edificio, predice el porcentaje anual de horas fuera de confort con un error relativo entorno al 8 % con respecto a los datos de monitorización, y reduciendo los tiempos de computación en un 98 % con respecto a herramientas de simulación como EnergyPlus.

Estos modelos predictivos tienen un gran potencial para el análisis a nivel urbano, siendo posible incorporar proyecciones climáticas a largo plazo para evaluar

la influencia del calentamiento global en el comportamiento ambiental y energético de estos edificios (15), así como medidas de rehabilitación energética para analizar su rendimiento y optimizar el proceso de aplicación de las mismas.

Tabla 1.Descripción de las sondas utilizadas para determinar la transmitancia térmica (U) de los cerramientos.

Variable	Equipo	Nº	Ubicación	Ud.	Rango medición	Precisión
Temperatura superficial	Sonda termopar (TESTO 0602 0394)	1	Superficie exterior cerramiento	°C	-50,+350	±0.5°C (0.3%)
Temperatura superficial	Triple sonda termopar (TESTO 06141635)	1	Superficie interior cerramiento	°C	-20,+70	±0.1 °C (0.2%)

Tabla 2.Variables energéticas y ambientales interiores monitorizadas: sistema integrado (vivienda tipo).

Variable	Equipo	Nº	Ubicación	Ud.	Rango medición	Precisión
Temperatura aire	Sonda de temperatura (Johnson Controls WRS-TTR0000-1)	4	Salón Dormitorio Cara interior y exterior cerramiento	°C	-40,+71	±0.6 °C
Humedad relativa	Sonda de humedad (Johnson Controls WRS-TTR0000-1)	2	Salón Dormitorio	%	5-95	-
Concentración CO <sub>2</sub>	Sonda CO <sub>2</sub> (Johnson Controls CD-W00-00-0)	1	Salón	ppm	0-2.000	± 40 ppm (3.0%)
Velocidad del aire	Anemómetro	1	Conducto ventilación	m/s	-	-
Caudal de aire	Caudalímetro	1	Conducto ventilación	m³/h	-	-
Consumo energético total	Contador eléctrico (Johnson Controls M30220)	1	Cuadro general	kWh	0-60 A	-
Consumo energético HVAC	Contador eléctrico (Johnson Controls M30120)	1	Cuadro general	kWh	0-30 A	-
Consumo ACS	Contador ACS (Johnson Controls C-M150-C-25)	1	Tubería ACS	m³/h	-	-
Temperatura ACS	Sensor temperatura (Johnson Controls TS-9101-8604)	1	Tubería ACS	°C	0,+100	±1.0%
Presencia	Detector infrarrojos (Johnson Controls PIR2124W)	2	Salón Dormitorio	-	-	-
Apertura ventanas	Contacto Magnético (Johnson Controls 401HC)	2	Salón	-	-	-

Tabla 3. Variables ambientales exteriores monitorizadas: sistema integrado (estación meteorológica).

Variable	Equipo	N°	Ubicación	Ud.	Rango medición	Precisión
Temperatura aire	Sonda de temperatura (Johnson Controls TS-9101-8402)	4	Estación Meteorológica	°C	-20,+40	±1.0%
Humedad relativa	Sonda de humedad (Johnson Controls HT-9000-UD1)	2		%	0-100	±4.0%
Concentración CO <sub>2</sub>	Sonda CO <sub>2</sub> (Johnson Controls CD-W00-00-0)	1		ppm	0-2.000	± 40 ppm (3.0%)
Radiación solar	Piranómetro (Johnson Controls SOND-RAD)	1		W/m <sup>2</sup>	-	-
Velocidad viento	Anemómetro (Johnson Controls MR10/PV01)	1		m/s	-	-

Tabla 4. Variables energéticas y ambientales interiores monitorizadas: sistema local (vivienda tipo).

Variable	Equipo	N°	Ubicación	Ud.	Rango medición	Precisión
Temperatura aire	Sonda temperatura, humedad y CO <sub>2</sub> (WOHLER CDL 210)	2	Salón Dormitorio	°C	-10,+60	±0.6 °C
Humedad relativa				%	5-95	±3.0%
Concentración CO <sub>2</sub>				ppm	0-2.000	±50 ppm
Consumo energético total	Contador (CurrentCostEnvir)	1	Cuadro general	kWh	0-100 A	±10%
Consumo energético pormenorizado		9	Enchufes	kWh	0-13 A	±10%

## 4. Conclusiones

Existe un importante parque de vivienda social que necesita ser rehabilitado para solventar las graves carencias energéticas y de confort detectadas tras una amplia muestra de monitorización y ensayos in situ en diferentes zonas climáticas de Andalucía. Los resultados obtenidos evidencian además que los patrones de uso extraídos difieren notablemente de los estándares establecidos por el CTE para su aplicación a las herramientas oficiales de calificación energética.

La experiencia acumulada permite aplicar una evaluación energética del parque residencial andaluz a escala urbana aplicando diferentes técnicas desde un enfoque bottom-up, de la escala pequeña, mediante bloques de viviendas representativos, hasta una escala urbana.

A partir de los modelos de simulación validados, los modelos predictivos son una herramienta viable y sencilla que permite, con limitados recursos computacionales y temporales, obtener una imagen global del estado energético del parque residencial a escala urbana. Por ello pueden ser utilizados como instrumentos iniciales en los procedimientos de gestión en la rehabilitación y renovación del parque residencial. Su empleo permitirá asistir a los responsables, agentes y administraciones intervinientes en los procesos de regeneración urbana en la fase de toma de decisiones, permitiendo establecer un orden de prioridad en las intervenciones, así como identificando las variables más sensibles y con el máximo potencial de mejora de la eficiencia energética, confort térmico y calidad de vida de los usuarios.

## 5. Bibliografía

- (1) Sendra, J.J., Domínguez, S., Bustamante, P., y León, A.L. (2013). Energy intervention in the residential sector in the south of Spain: Current challenges. *Informes de la Construcción*, 65 (532), 457-464. doi:10.3989/ic.13.074
- (2) Guerra-Santin, O., y Tweed, C.A. (2015). In-use monitoring of buildings: An overview of data collection methods. *Energy and Buildings*, 93, 189-207. doi:10.1016/j.enbuild.2015.02.042
- (3) Sunikka-Blank, M., y Galvin, R. (2012). Introducing the prebound effect: the gap between performance and actual energy consumption. *Building Research & Information*, 40, 260-273. doi:10.1080/09613218.2012.690952
- (4) Guerra-Santin, O., Romero, N., Cuerda, E., y Keyson, D. (2016). Mixed methods approach to determine occupants' behaviour - Analysis of two case studies. *Energy and Buildings*, 130, 546-566. doi:10.1016/j.enbuild.2016.08.084
- (5) TEP-130: Arquitectura, patrimonio y sostenibilidad. Acústica, iluminación, óptica y energía. Disponible en: <https://grupo.us.es/grupotep130/es/> (accedido a 10 Mayo 2020).
- (6) Sendra, J.J., Suárez, R., León, A.L., Hervás, M. (2019) La materialidad en la arquitectura del Movimiento Moderno. Investigación teórica y constructiva: comportamiento ambiental y energético. En: re-HABITAR El Carmen. Un proyecto sobre patrimonio contemporáneo. Gómez, J.L., García de Casasola, M. (coord. cc), Espino, B. (coord. ed.). Sevilla: Consejería de Cultura y Patrimonio Histórico, pp. 216-227. ISBN: 978-84-9959-344-9.
- (7) Martínez-Hervas, M., Sendra, J.J., Suárez, R. (2015). Towards a Sustainable Retrofitting Plan for Social Housing in Mediterranean Europe. En: *The Sustainable Renovation of Buildings and Neighbourhoods*. Mercader, P (Ed.). Sarja: Bentham eBooks, pp. 147-164. ISBN: 978-1-68108-065-9.
- (8) León, A.L., Muñoz, S., León, J., y Bustamante, P. (2010). Monitorización de variables medioambientales y energéticas en la

- construcción de viviendas protegidas: Edificio Cros-Pirotecnica en Sevilla. *Informes de la Construcción*, 62 (519), 67-82. doi:10.3989/ic.09.045
- (9) Fernández-Agüera, J., Domínguez, S., Sendra, J.J., y Suárez, R. (2018). Social housing airtightness in Southern Europe. *Energy and Buildings*, 185, 377-391. doi:10.1016/j.enbuild.2018.10.041
- (10) Escandón, R., Suárez, R., y Sendra, J.J. (2017). On the assessment of the energy performance and environmental behaviour of social housing stock for the adjustment between simulated and measured data: The case of mild winters in the Mediterranean climate of southern Europe. *Energy and Buildings*, 152, 418-433. doi:10.1016/j.enbuild.2017.07.063
- (11) Martínez-Hervás, M., Sendra, J.J., y Suárez, R. (2017). Towards an energy assessment on an urban scale for retrofitting the housing stock in Mediterranean cities. *Procedia Environmental Sciences*, 38, 688-695. doi:10.1016/j.proenv.2017.03.150
- (12) Martínez-Hervas, M. (2018). Generación de un modelo de evaluación energética a escala urbana para la rehabilitación sostenible del parque residencial de ciudades mediterráneas: aplicación a la provincia de Cádiz (Tesis doctoral). Universidad de Sevilla.
- (13) Fernández-Agüera, J., Domínguez, S., Sendra, J.J., y Suárez, R. (2019). Predictive models for airtightness in social housing in a Mediterranean region. *Sustainable Cities and Society*, 51. doi:10.1016/j.scs.2019.101695
- (14) Escandón, R., Ascione, F., Bianco, N., Mauro, G.M., Suárez, R, y Sendra, J.J. (2019). Thermal comfort prediction in a building category: Artificial Neural Network generation from calibrated models for a social housing stock in southern Europe. *Applied Thermal Engineering*, 150, 492-505. doi:10.1016/j.applthermaleng.2019.01.013
- (15) Escandón, R., Suárez, R., Sendra, J.J., Ascione, F., Bianco, N., Mauro, G.M. (2019). Predicting the Impact of Climate Change on Thermal Comfort in A Building Category: The Case of Linear-type Social Housing Stock in Southern Spain. *Energies*, 12, 2238. doi: 10.3390/en12122238



# Monitorización de barrios residenciales de promoción pública de Madrid con edificación altamente ineficiente y población vulnerable

El proyecto HABITARES

SCHE-IETCC. CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS (CSIC)

**F. Martín-Consuegra(1), F. de Frutos (1); I. Oteiza (1); C. Alonso (1); B. Frutos (1); Pérez, G. (2)**

(1) Arquitectos del grupo de investigación de Sistemas Constructivos y Habitabilidad en la Edificación. Instituto Eduardo Torroja de ciencias de la construcción (CSIC). Madrid (España).

(2) Doctora en ciencias físicas del grupo de investigación Reciclado de Materiales. Instituto Eduardo Torroja de ciencias de la construcción (CSIC). Madrid (España).

Persona de contacto/Corresponding author: martin-consuegra@ietcc.csic.es  
ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-2714-6910>

## Monitorización de barrios residenciales de promoción pública de Madrid con edificación altamente ineficiente y población vulnerable. El proyecto HABITARES

### RESUMEN

El proyecto HABITARES analiza la necesidad de rehabilitación integral de barrios residenciales de promoción pública construidos durante el periodo de 1940 a 1979. Situados en las periferias de Madrid, muchos de ellos están catalogados como barrios vulnerables y su edificación es altamente ineficiente. Los modelos teóricos desarrollados en base a la demanda ofrecen resultados muy prometedores en cuanto al potencial de mejora de la eficiencia que se conseguiría mediante su rehabilitación energética. Estos modelos no tienen en cuenta la incidencia que tienen las circunstancias socioeconómicas de la población en los consumos de energía final. El problema de la pobreza energética, situación en la cual no se cubren las necesidades energéticas básicas, tiene una de sus principales causas en la obsolescencia de la edificación. Se realiza una campaña de monitorización de una muestra de viviendas situadas en estas áreas urbanas, con el objetivo de calibrar los modelos utilizando datos registrados acerca de la calidad del ambiente interior en los hogares y los consumos energéticos realizados durante un periodo de un año.

**Palabras clave:** Rehabilitación urbana, eficiencia energética, calidad ambiental interior, consumo

## *Monitoring of residential public development quarters in Madrid containing highly inefficient buildings and vulnerable population. HABITARES Project*

### ABSTRACT

*The need for comprehensive rehabilitation of publicly promoted residential neighbourhoods built during the period from 1940 to 1979 is assessed by HABITARES project. Located in the outskirts of Madrid, many of them are classified as deprived neighborhoods and contain highly inefficient buildings. A theoretical model is developed based on energy demand with promising results in terms of efficiency improvement potential. These models do not take into account the population's socio-economic circumstances such as energy poverty: situations in which basic needs are not covered. A monitoring campaign is carried out in a sample of dwellings with the aim of calibrating the model with registered data including the quality of the indoor environment and the energy consumption during a one year period.*

**Keywords:** *Urban refurbishment, energy efficiency, indoor environmental quality, consumption*

## 1. Introducción

La rehabilitación integral de edificios de vivienda de sectores vulnerables de las ciudades, es una necesidad que en España se ha ido aplazando por diferentes circunstancias, debido inicialmente a la burbuja inmobiliaria dedicada principalmente a la nueva construcción (2000-2007) y posteriormente al pinchazo de la misma (2009-2014)(1). Las directivas europeas y la reglamentación nacional son cada vez más exigentes en materia de energía, apuntando a la consecución de los objetivos para Edificios de Energía Casi Nula (2). El proyecto HABITARES (3) trata de analizar el estado actual de las áreas vulnerables en Madrid(4), señaladas como cluster de ineficiencia en trabajos previos (5, 6), y proponer criterios de actuación para la mejora de su habitabilidad y eficiencia energética mediante la incorporación de medidas pasivas (7).

En este artículo se presenta una propuesta para la monitorización de diferentes edificios situados en 6 barrios periféricos de Madrid. La validación del modelo teórico desarrollado en una fase previa del proyecto (8) se realiza mediante la monitorización expuesta en el trabajo que aquí se presenta.

## 2. Objetivos

Para evaluar las actuaciones se construye un modelo teórico que se valida con información detallada recogida in-situ, y que es capaz de integrar aspectos de habitabilidad y consumo energético. El modelo permite estudiar las estrategias tanto en los edificios como para su agrupación y analizar actuaciones a escala urbana (9).

Se plantea una toma de datos integral para aumentar el conocimiento acerca de la eficiencia energética de la edificación en los barrios de periferia construidos en el periodo 1940-1980. El análisis de los consumos energéticos y las condiciones de habitabilidad en el estado actual permitirá concretar el escenario base sobre el que se tienen que apoyar las políticas de rehabilitación energética del parque residencial. Este diagnóstico previo permitirá trazar estrategias de mejora basadas en datos reales.

En concreto, se pretende caracterizar las condiciones de habitabilidad a través de la calidad del ambiente

interior (temperatura, humedad y calidad del aire) y el análisis del consumo energético (electricidad, gas natural y otras fuentes) registrado en un conjunto de viviendas, con el objetivo de calibrar el modelo realizado en base a las estimaciones de demanda. Esto permitirá caracterizar la brecha existente entre la demanda prevista y el consumo real y afinar las predicciones de reducción de consumos energéticos esperados en las actuaciones de mejora de la eficiencia energética. El modelo realizado para el proyecto HABITARES se basa en la evaluación de la mejora pasiva de la edificación, dirigida a reducir las necesidades de energía en las viviendas.

Se pretende a su vez informar de los resultados a la población monitorizada para aumentar su nivel de conciencia sobre el problema de los consumos energéticos y la calidad de vida. Se pretende que los resultados obtenidos permitan a la población residente en estos barrios participar activamente e informarse sobre los beneficios y costes de las actuaciones de mejora.

Otro de los objetivos específicos del proyecto para el ámbito urbano es la realización de un catálogo o inventario con la caracterización óptica de los acabados superficiales más frecuentes de las áreas urbanas de la ciudad de Madrid. Para ello se plantea la realización de medidas de reflectancia in-situ en los pavimentos y paramentos verticales de los barrios analizados. Esta investigación se podrá utilizar más adelante para compararla con los estudios de la Isla de Calor Urbana.

## 3. Metodología

La metodología está basada en la propuesta metodológica para la monitorización de la rehabilitación energética en viviendas sociales desarrollada en trabajos anteriores del grupo de investigación en Sistemas Constructivos y Habitabilidad en la Edificación (10). En el momento de la elaboración del presente artículo se cuenta con información correspondiente a 22 viviendas en 6 barrios de periferia de Madrid (zona climática D3) (Figura 1).

Para ello se integra información proveniente de diferentes escalas. En concreto se realizan encuestas a los usuarios y se analizan los datos de consumos registrados por contadores inteligentes (11). A continuación se monitoriza el comportamiento energético y el nivel de

confort en diferentes viviendas. Los resultados se comparan con los consumos teóricos calculados a partir de la estimación de la demanda energética de calefacción obtenida del modelo teórico. El análisis de la brecha entre el consumo teórico y el monitorizado permitirá abordar distintos enfoques de las operaciones de rehabilitación urbana.

De forma paralela se realizan medidas de reflectancia para determinar la respuesta óptica de las superficies de los acabados existentes.

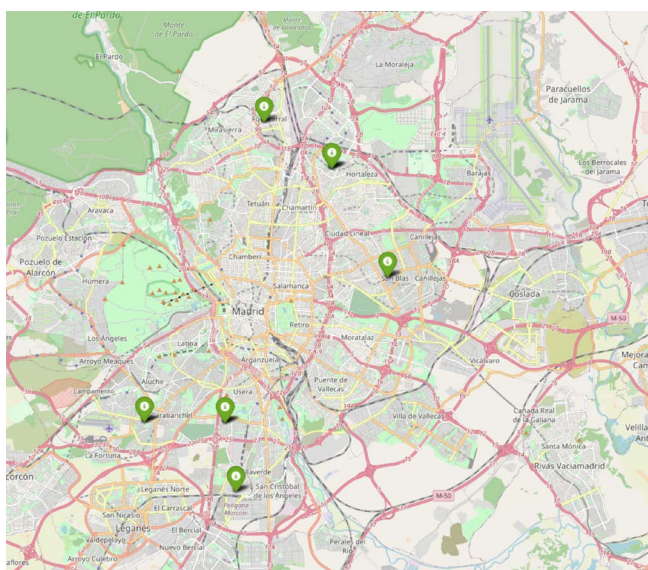


Fig 1: Ubicación de la muestra de edificios monitorizados en la periferia de Madrid

### 3.1. Encuestas

La encuesta dura aproximadamente 30 minutos y las preguntas se centran en la vivienda, el hogar, la instalación y las facturas.

- Datos de vivienda. Superficie y antigüedad del edificio, propiedad y preguntas generales sobre deficiencias en construcción y tipo de ventanas.
- Datos sobre el hogar. Número de habitantes, ocupación media declarada, hábitos de ventilación y hábitos de uso de los equipos de acondicionamiento térmico, comodidad declarada del hogar en invierno y verano, medidas de mejora y medidas de ahorro de energía a la escala de la vivienda.
- Datos sobre la instalación de ACS, calefacción, refrigeración y cocinas definidas por la fuente de energía y el sistema de producción.

- Datos de facturas eléctricas y gas. Se solicita una factura de electricidad y gas según los diferentes casos; El Código Universal de Punto de Suministro (CUPS) incluido en la factura permite acceder al consumo histórico. Son datos privados que se obtienen consultando al proveedor siempre con el consentimiento del propietario de la factura. El consumo se define en kWh con registro temporal variable.

La información de cada vivienda se anonimiza mediante un número de identificación. Se incluye información sobre la superficie, año de construcción, tipo de tenencia, número de ocupantes y el número del piso del edificio en el que se encuentra la vivienda. Además, se recopila la declaración de confort de los usuarios en invierno y verano, los hábitos de ventilación y el tipo y la fuente de energía para la calefacción. También se analiza la disponibilidad de contadores inteligentes en electricidad y gas natural.

### 3.2. Información registrada por contadores inteligentes

En un segundo paso se recopila la información sobre el consumo de energía registrado en cada vivienda a partir de su CUPS, y se relaciona con la temperatura exterior. Este proceso se realiza para los usos energéticos declarados por los ocupantes en las encuestas, permitiendo acceder a datos de electricidad y gas natural.

La información contenida en los medidores inteligentes permite evaluar el consumo de energía en las viviendas de manera sencilla, pero es difícil desagregar por usos los datos obtenidos. En la Figura 2 se representan los datos mensuales históricos (2016-2018) de dos viviendas ejemplo y la temperatura exterior registrada por AEMET para Madrid (estación meteorológica Retiro)(12).

El consumo de energía en la vivienda de Madrid se basa principalmente en la electricidad y el gas natural. Otras fuentes de energía que se han encontrado en la muestra son:

- Gasóleo para calefacción en el caso de viviendas con servicio de calefacción urbana y en un caso de vivienda equipada con instalación individual de gasóleo para calefacción y ACS.
- El butano se usa en algunos casos, principalmente para ACS instantáneo y para cocinar.

Tanto el gas butano como el gasoil no son registrados por los contadores, por lo que es imposible cuantificarlos con este método.

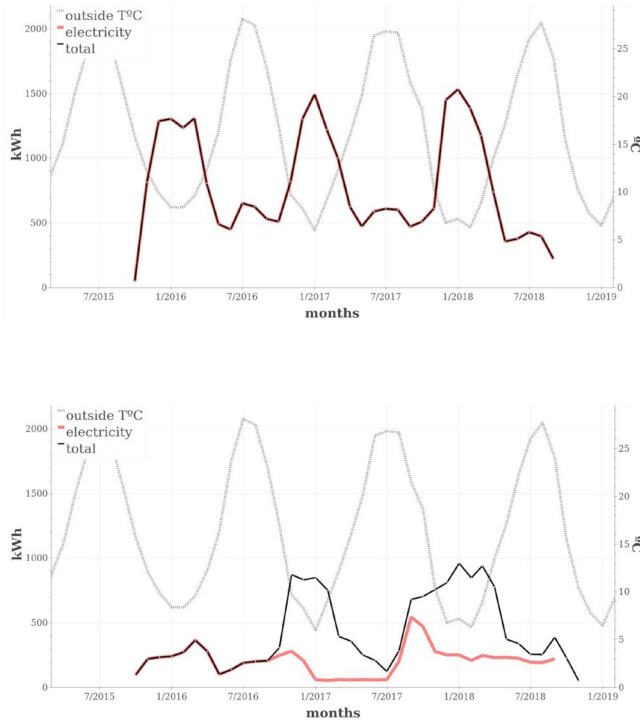


Fig. 2. Consumos energéticos registrados por los contadores en viviendas (a) con equipamiento 100% eléctrico y (b) agregados para una vivienda con suministro de gas natural y electricidad.

Tabla 1: Descripción técnica de los sensores de la calidad ambiental interior

<b>Medidas</b>	140 × 66 × 50 mm
<b>Peso</b>	150 g (incl. baterías )
<b>Material</b>	plástico, metal
<b>Alimentación</b>	3x baterías recargables AA , duración > 1 año.
<b>Sensores</b>	CO <sub>2</sub> , temperatura, humedad
<b>Protección</b>	IP20
<b>Precisión</b>	CO <sub>2</sub> ±50 ppm, ±3 % de lectura Termómetro: ±0.4 °C Humedad: ±4 %RH
<b>Radio protocolo</b>	proprietary protocol Chirp (433 MHz, 868 MHz opcional)
<b>Condiciones trabajo</b>	de +5 hasta +50 °C, de 0 hasta 80 %RH
<b>Tipo de antena</b>	interna

### 3.3. Monitorización

La monitorización permite conocer las condiciones de confort y calidad del aire en las viviendas además de aportar una mayor resolución en los datos de consumos energéticos. El periodo de monitorización mínimo se fija en un año y los registros se realizan cada diez minutos.

#### 3.3.1. Calidad del ambiente interior

La monitorización de la calidad del ambiente interior comprende los parámetros de temperatura (°C) y humedad relativa (%), además de incluir un indicador de la calidad del aire a través de la medición de la concentración de CO<sub>2</sub> (ppm). Se instalan equipos en la sala de estar y en el dormitorio principal. En la Tabla 1 se describen las características técnicas de los sensores de calidad del aire interior.

#### 3.3.2. Consumos

Se registran datos de los consumos energéticos para electricidad y gas natural mediante la instalación de equipos de monitorización. Los consumos de gasoleo y butano se estiman a partir de la información declarada por los usuarios en las encuestas. En las Tablas 2 a 4 se detallan las características técnicas de los sensores utilizados para registrar consumos.

Para el registro de los datos de consumo eléctrico general se ha utilizado un sensor de pinza de la solución Energomonitor Powersense (Tabla 2). Este equipo permite medir el consumo de electricidad y la producción en instalaciones monofásicas o trifásicas.

Tabla 2: Descripción técnica de los sensores utilizados para el registro del consumo general eléctrico

	<b>Transmisor</b>	<b>Sensor</b>
<b>Medidas</b>	45 × 92 × 29 mm (without antenna)	55 × 60 × 30, Ø 12 mm
<b>Alimentación</b>	2x baterías intercambiable AA 1.5 V Duración baterías > 2 años	-
<b>Rango de medición</b>	< 3 × 300 A	< 80 A, 20 W - 20 kW
<b>Resolución</b>	1 W	-
<b>Conversión</b>	190-250 V, pasos de 5 V	-
<b>Interfaz</b>	3x CT inputs	CT output
<b>Radio protocolo</b>	proprietary protocol Chirp, 433 MHz	-
<b>Condiciones trabajo</b>	de 0 hasta +60 °C, 20 hasta 90 %RH	de -20 °C hasta +60 °C, 10 to 90 %RH
<b>Tipo de antena</b>	SMA conector (con antena externa)	-

Además del consumo general, se incluye el registro del consumo eléctrico de los aparatos que pueden tener consumos importantes de acuerdo con las respuestas declaradas por los usuarios en las encuestas. Para ello se utilizan sensores que permiten medir directamente el consumo del enchufe (tabla 3).

Tabla 3: Descripción técnica de sensores de enchufe

<b>Medidas</b>	103 × 86 × 62 mm
<b>Alimentación</b>	230 V / 50 Hz
<b>Tipo Enchufe</b>	E CEE 7/5-6 (French) / F CEE 7/3-4 (Schukostecker)
<b>Rango de medición</b>	< 13 A
<b>Resolución medida</b>	1 W
<b>Consumo</b>	1,5 W (activado on) / 0,5 W (desactivado Off)
<b>Radio protocolo</b>	proprietary protocol Chirp (433 MHz, 868 MHz optionally)
<b>Tipo de antena</b>	interna
<b>Condiciones trabajo</b>	de 0 hasta +60 °C, 20 hasta 90 %RH

Tabla 4: Descripción técnica de los sensores utilizados para el registro del consumo general eléctrico

	<b>Transmisor</b>	<b>Sensor</b>
<b>Medidas</b>	45 × 92 × 29 mm (sin antena)	depende tipo contador; cable 1 m
<b>Alimentación</b>	2x baterías intercambiables AA 1.5 V, duracion baterías > 2 años	directa del transmisor
<b>Rango de medición</b>	2 <sup>32</sup> imp. contador	> 10 ms intervalo de pulso
<b>Resolución</b>	1 W	-
<b>Conversión pulsos</b>	10, 100, 1000, 10000 imp/m <sup>3</sup>	-
<b>Interfaz</b>	1x pulse input	1x pulse output
<b>Radio protocolo</b>	proprietary protocol Chirp (433 MHz, 868 MHz optionally)	-
<b>Condiciones trabajo</b>	from -20 °C to +60 °C, 10 to 90 %RH	from -20 °C to +60 °C, 10 to 90 %RH
<b>Tipo de antena</b>	SMA conector (con antena externa)	-
<b>Protección</b>	IP20	-

Para el caso del gas natural se ha utilizado un sensor de gas que permite medir el consumo directamente en el contador general (Tabla 4).

### 3.3.3. Datos climáticos

Se incorpora una estación meteorológica en cada una de los seis barrios analizados para recabar información de las condiciones microclimáticas en el entorno próximo. En la Tabla 5 se describen las características técnicas de la estación meteorológica utilizada.

Tabla 5: Descripción técnica de los sensores de la estación meteorológica Froggit WH3000

<b>Distancia de transmisión</b>	100 m (en condiciones óptimas, contacto visual)
<b>Frecuencia de transmisión</b>	868 MHz
<b>Rango de temperaturas</b>	-40 °C -- 60 °C
<b>Precisión</b>	+/- 1 °C
<b>Resolución</b>	0,1 °C
<b>Rango de medida de humedad relativa</b>	10 % - 99 %
<b>Precisión</b>	+/- 5 %
<b>Precipitación</b>	0 – 6000 mm
<b>Precisión</b>	+/- 10 %
<b>Resolución</b>	0,1 mm - 1 mm
<b>Velocidad del viento</b>	0-50 m/s (0 ~100mph)
<b>Precisión</b>	+/- 1m/s (velocidad del viento < 5m/s) +/- 10 % (velocidad del viento > 5m/s)
<b>Luz</b>	0-200k Lux
<b>Precisión</b>	+/- -15 %
<b>Intervalo de medida de sens. exteriores</b>	16 seg.
<b>Internet</b>	La estación meteorológica envía sus datos meteorológicos por Wifi a la plataforma meteorológica WeatherUnderground

Tabla 6. Descripción técnica gateway

<b>Medidas</b>	110 × 80 × 26 mm (sin antena)
<b>Peso</b>	128 g
<b>Material</b>	Aluminio anodizado / plástico
<b>Alimentación</b>	5V DC, 500 mA, USB-B
<b>Consumo</b>	2 W max.
<b>Protección</b>	IP20
<b>Conexión</b>	RJ-45 10/100 Mb/s, RS-232
<b>Radio protocolo</b>	proprietary protocol Chirp, 433 MHz band (868 MHz optionally)
<b>Condiciones trabajo</b>	de 0 to +60 °C, de 10 to 90%RH
<b>Tipo de antena</b>	telescopica (433 MHz)

### 3.3.4. Comunicación

El dispositivo Gateway recibe la señal de hasta 30 sensores y este lo envía cada 6 segundos a la plataforma para el procesado de los datos. Ofrece la seguridad de almacenamiento de los datos en caso de pérdida de conexión con el servidor de hasta 4 días. En la Tabla 6 se describen las características técnicas del dispositivo.

La Figura 3 representa el esquema modular y flexible de las soluciones IoT para medir los consumos energéticos (electricidad, gas) y calidad del aire (temperatura, humedad, CO<sub>2</sub> concentración) en tiempo real.

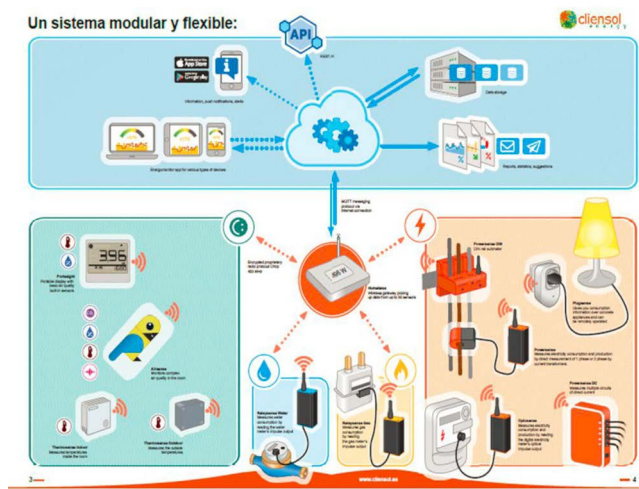


Fig. 3. Esquema modular y flexibles de las soluciones IOT. Fuente: Cientsol

La Plataforma de vigilancia energética permite el seguimiento a tiempo real de monitorización, utilizando la solución en la nube, para la seguridad completa de los datos y accesible desde cualquier dispositivo móvil (Figura 4).



Fig. 4: Plataforma monitorización. Fuente: Stechome

La aplicación APP-monitorización permite el seguimiento individualizada para cada una de las viviendas desde cualquier dispositivo móvil (Figura 5).

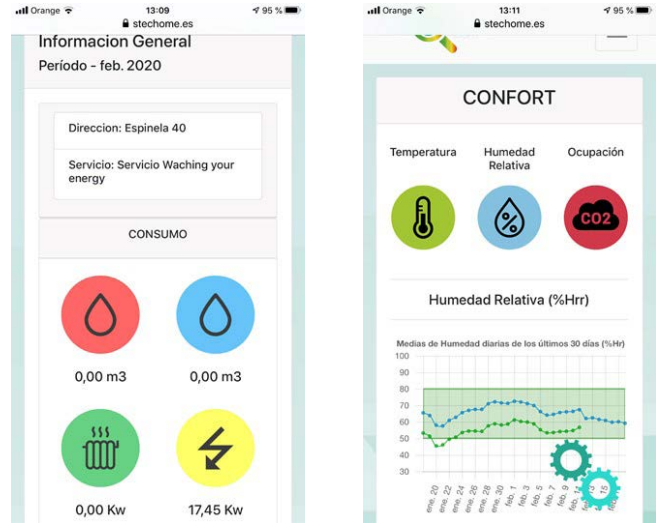


Fig. 5: APP-monitorización. Fuente: Stechome

### 3.3.5. Proceso de datos

Los datos de monitorización son almacenados en archivos diarios CSV con información cada 10 minutos. Todos los programas para el procesado de datos han sido desarrollados en lenguaje Python, administrado por la Python Software Foundation con una licencia de código abierto. El flujo del tratamiento de datos se sintetiza en los siguientes epígrafes:

- Programas de descarga de información
- Programas de limpieza y unificación de datos.
- Programas de generación de las figuras
- Programas de salida unificada de informes
- Estudio individualizado por vivienda de los resultados obtenidos.
- Determinación del escenario real de la vivienda
- Desarrollo de medidas de mejora o calidad de las mismas en el caso de que existan ya medidas de rehabilitación energética aplicadas

### 3.3.6. Mediciones puntuales

La respuesta óptica en el rango de la radiación solar de los materiales de acabado que conforman los espacios públicos de la ciudad tiene una repercusión en el comportamiento energético de los edificios y el microclima urbano.

En trabajos previos se ha podido analizar el efecto del acabado superficial de los edificios en el comportamiento energético, de cara a su rehabilitación (13, 14). Como continuación de estos trabajos se amplía aquí la investigación al ámbito del espacio urbano.

Para ello se mide la reflectancia de los materiales opacos en el rango de longitud de onda entre 350 y 1700 nm utilizando un espectrómetro portátil de fibra óptica Stellarnet con una esfera integradora.

## 4. Resultados

En este apartado se reflejan ejemplos de los resultados que se obtienen a partir de la campaña de monitorización.

### 4.1.1. Calidad del ambiente interior

Para el análisis, los datos registrados se agrupan por periodo utilizando la media estadística (hora, día, mes). Se visualizan los resultados de cada parámetro mediante gráficas generales de todo el periodo (Figura 5), gráficos circulares representando el porcentaje de tiempo en cada rango de referencia (Figura 6) y perfiles diarios en invierno, verano y anual (Figura 7).

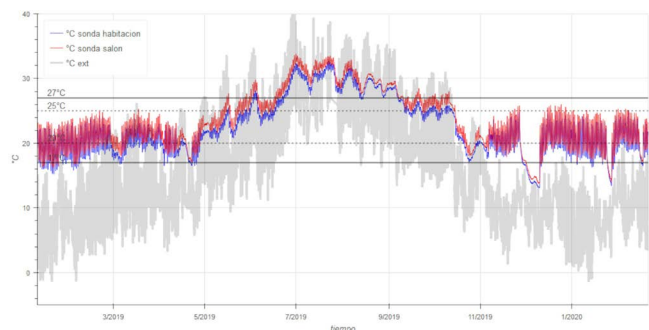


Fig. 5: Ejemplo de resultados obtenidos para la temperatura (°C) para todo el periodo

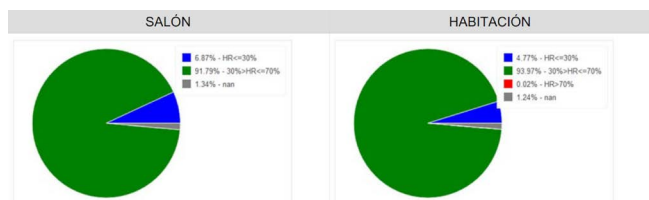


Figura 6 – Ejemplo de resultados de humedad (%) por rangos de confort

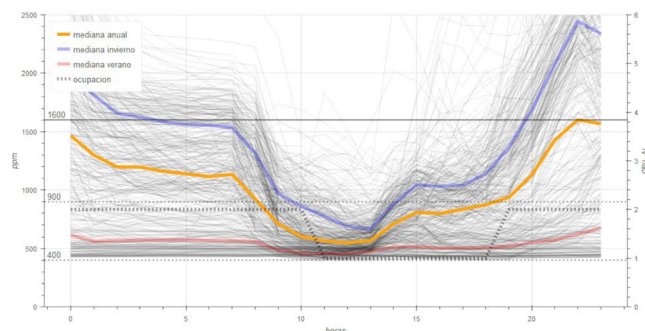


Figura 7– Ejemplo de resultados de CO<sub>2</sub> (ppm) en perfiles diarios

### 4.1.2. Consumos

Se obtienen resultados para electricidad y gas natural. Los consumos registrados se desagregan por servicios (calefacción ACS, refrigeración y resto de usos) en los casos en los que ha resultado posible instalar medidores independientes.

Los resultados se visualizan de manera independiente para cada suministro existente en la vivienda (Figura 8). Se realizan gráficas para todo el periodo, y se calculan los perfiles diarios de uso distinguiendo entre anual, invierno y verano (Fig 9).

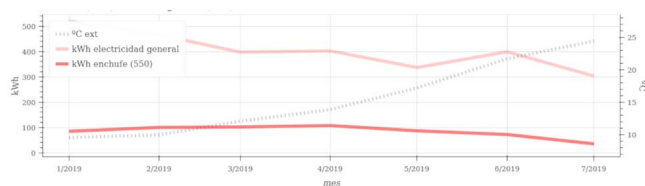


Fig. 8: Ejemplo de consumo eléctrico registrado para ACS y total para todo el periodo

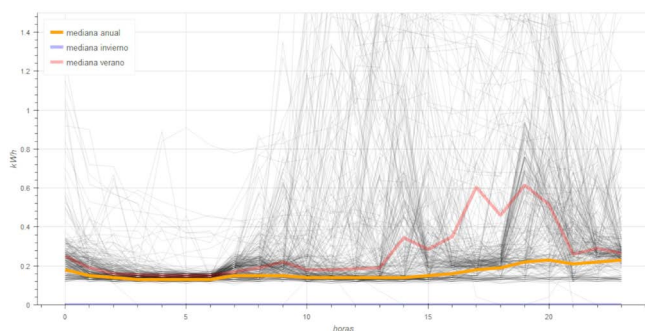


Fig. 9: Ejemplo de perfil diario de consumo de electricidad en verano (refrigeración)



Se establece también una comparación entre los datos obtenidos de los contadores inteligentes y los datos registrados en la campaña de monitorización. Esto permite comparar los consumos históricos con los registrados durante la campaña de monitorización.

#### 4.1.3. Reflectancia

Se obtienen espectros de reflectancia en el rango de 350 a 1700 nm, que abarca más del 90% de la energía solar (Figura 10). A partir de los espectros experimentales se calculan los parámetros de reflectancia/absortancia en el rango visible y solar de acuerdo con la norma UNE EN-410.

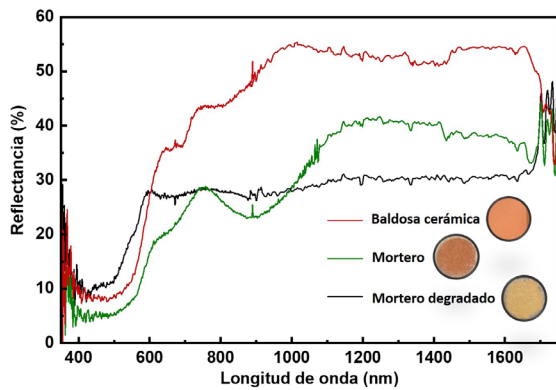


Fig. 10: Espectros de reflectancia obtenidos para tres acabados de fachada.



Fig 11: Indicador de pérdidas energéticas calculado para todos los edificios del barrio de Simancas mediante la herramienta MEPEC

## 5. Discusión

La monitorización de consumos supone la mayor complejidad. Las diferentes fuentes de energía utilizadas en cada vivienda hacen difícil la automatización del proceso. Además, en cada vivienda se cubren los diferentes servicios con diferentes fuentes de energía lo cual hace que haya que establecer prácticamente un análisis pormenorizado para cada vivienda. Se pretende avanzar en la agrupación de las diferentes modalidades para poder establecer comparaciones claras.

La información proporcionada por los contadores inteligentes es relevante para la investigación y sería muy útil para el establecimiento de un protocolo de monitorización mínima que permita reducir costes, pero resulta difícil de obtener. A pesar del creciente despliegue de medidores inteligentes en la UE, en España la información no es de fácil acceso para los investigadores. Por un lado, aún no están instalados en todas las viviendas, aunque la implantación está aumentando rápidamente, y pronto se generalizará. Por otro lado, los investigadores necesitan una autorización de los ocupantes para usar sus datos privados, y no todos los usuarios están dispuestos a hacerlo. Las empresas de energía solo tienen la obligación de proporcionar los datos registrados a las empresas comercializadoras.

Queda por despejar la duda de si el número de viviendas monitorizadas va a ser suficientemente representativo como para calibrar el modelo de análisis espaciales (MADE) desarrollado para los barrios seleccionados en las fases previas del proyecto. El modelo evalúa la calidad térmica de la edificación a la escala urbana con bastante detalle gracias a la explotación de los datos catastrales en abierto (Figura 11). Esto se valorará en función de la dispersión de los resultados cuando se hayan recogido datos durante un periodo de al menos un año para todas las viviendas de la muestra.

## 6. Conclusiones

Los resultados obtenidos de la campaña de monitorización se utilizarán para establecer diferentes perfiles de usuario. También permitirán calibrar los modelos energéticos teóricos construidos en base a la estimación de

las necesidades energéticas básicas a partir del cálculo de la demanda energética. La comparación de los modelos de estimación con los resultados de la monitorización permitirá establecer conclusiones acerca de la brecha entre el consumo y la demanda teniendo en cuenta la calidad del ambiente interior. Esta información es necesaria para poder realizar planes de Regeneración Urbana Integrada teniendo en cuenta aspectos energéticos y sociales.

La monitorización del consumo de energía en las viviendas permite desagregar los diferentes usos de la energía, pero financiarla supone un alto costo. La comparación de este análisis con los resultados futuros de la campaña de monitorización anual será interesante para probar si la información contenida en los medidores inteligentes es suficiente para evaluar con suficiente precisión el consumo de energía en las viviendas.

## 7. Agradecimientos

Al Proyecto de investigación BIA2017-83231-C2-1-R. “Nueva herramienta integrada de evaluación para áreas urbanas vulnerables. Hacia la autosuficiencia energética y a favor de un modelo de habitabilidad biosaludable”. Proyecto Habita\_RES – (2018-2021) MINECO -Programa Estatal de I+D+i Orientada a los Retos de la Sociedad.

Al Proyecto LINKA20220 “Nanotechnology - based thermochromic materials for adaptive building envelopes” (2020-2021) financiado por el CSIC en la convocatoria i-Link+2019.

A los vecinos de las promociones de vivienda social de Madrid que nos han permitido acceder a sus casas y monitorizarlas. A la Empresa Municipal de la Vivienda y el Suelo de Madrid (EMVS) – Departamento de Rehabilitación- Dirección de Rehabilitación y obra nueva. Y a la empresa Vigilancia Energética.

## 8. Referencias

- (1) Martín-Consuegra, F., Alonso, C., Frutos, B. La regeneración urbana integrada y la declaración de Toledo. *Informes de la Construcción*. 2015, vol. 67, no. Extra-1, p. nt002.
- (2) European Parliament and UE Council. Directive 2018/844 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 amending Directive 2010/31/EU on the energy performance of buildings and Directive 2012/27/EU on energy efficiency (Text with EEA relevance). 2018. <http://data.europa.eu/eli/dir/2018/844/oj/eng>, (2019-02-01).
- (3) Oteiza, I. Proyecto Habita\_res – (2018-2021) Proyecto de investigación BIA2017-83231-C2-1-R. Nueva herramienta integrada de evaluación para áreas urbanas vulnerables. Hacia la autosuficiencia energética y a favor de un modelo de habitabilidad biosaludable. 2018. <https://proyectorhabita.res.ietcc.csic.es/>, (2020-02-15).
- (4) Hernández Aja, Agustín, Rodríguez Alonso, Raquel, Rodríguez Suárez, Iván, Gómez Giménez, José Manuel, González García, Isabel, Córdoba Hernández, Rafael, Alguacil Gómez, Julio, Camacho Gutierrez, Javier, Carmona Mateos, Fernando, Jaramillo Cáceres, Sergio. Barrios vulnerables de las grandes ciudades españolas. 1991/ 2001/ 2011. Madrid, E.T.S. Arquitectura (UPM), 2018, 475p., ISBN978-84-9728-568-1. <http://oa.upm.es/51015/>, (2018-11-06).
- (5) Ministerio de Fomento. ERESEE 2017. Actualización de la estrategia a largo plazo para la rehabilitación energética en el sector de la edificación en España. Secretaría de Estado de Infraestructuras, Transporte y Vivienda, 2017. <https://www.fomento.gob.es/el-ministerio/planes-estrategicos/estrategia-a-largo-plazo-para-la-rehabilitacion-energetica-en-el-sector-de-la-edificacion-en-espana>, (2019-11-22).
- (6) Oteiza, I., Carmen Alonso, Fernando Martín-Consuegra, Juan Monjo, Mariam González Moya, Alberto Buldón. La envolvente energética de la vivienda social. El caso de Madrid en el periodo 1939-1979. Madrid, Instituto Eduardo Torroja de ciencias de la construcción, 2018, (Monografías del IETcc. Serie Arquitectura), ISBN978-84-00-10454-2.
- (7) Alonso, Carmen. Rehabilitación energética de fachadas: Propuesta metodológica para la evaluación de soluciones innovadoras, basándose en el diagnóstico de viviendas sociales construidas entre 1940 y 1980. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica, Alimentaria y de Biosistemas, Universidad Politécnica de Madrid, 2015.
- (8) Martín-Consuegra Ávila, Fernando. Análisis de datos espaciales para la erradicación de la pobreza energética en la rehabilitación urbana : el caso de Madrid. E.T.S. Arquitectura (UPM), 2019, 332p., phd. <http://oa.upm.es/62611/>, (2020-05-21).
- (9) Martín-Consuegra, F., de Frutos, F., Oteiza, I., Hernández Aja, A. Use of cadastral data to assess urban scale building energy loss. Application to a deprived quarter in Madrid. *Energy and Buildings*. 2018, vol. 171, p. 50–63.
- (10) Alonso, C., Oteiza, I., Martín-Consuegra, F., Frutos, B. Methodological proposal for monitoring energy refurbishment. Indoor environmental quality in two case studies of social housing in Madrid, Spain. *Energy and Buildings*. 2017, vol. 155, no. Supplement C, p. 492–502.
- (11) Martín-Consuegra, F., Gouveia, J. P., Frutos, F. de, Alonso, C., Oteiza, I. “Energy consumption and comfort gap in social housing in Madrid, through smart meters and surveys information”. *Transition*. Vitoria-Gasteiz (Spain). Vitoria-Gasteiz (Spain), Universidad del País Vasco. Hernández Minguillón, Rufino J. (ed.), 2019.
- (12) AEMET. “AEMET OpenData”. Sistema para la difusión y reutilización de la información de AEMET. <https://opendata.aemet.es/>, (2019-07-02).
- (13) Alonso, Carmen, Martín-Consuegra, Fernando, Oteiza, Ignacio, Asensio, Eloy, Pérez, Gloria,

Martínez, Isabel, Frutos, Borja. Effect of façade surface finish on building energy rehabilitation. *Solar Energy*. 2017, vol. 146, p. 470–483.

- (14) Flores, V., Ruiz, L., Pérez, G., Frutos, B., Prieto, E., Martín-Consuegra, F. Determining the patina colors applied UV-VIS-NIR spectroscopy and Munsell system in the main façade of the Cathedral of Santo Domingo, Dominican Republic. Cáceres. Cáceres, 2018. [https://www.researchgate.net/publication/325389788\\_Determining\\_the\\_patina\\_colors\\_applied\\_UV-VIS-NIR\\_spectroscopy\\_and\\_Munsell\\_system\\_in\\_the\\_main\\_facade\\_of\\_the\\_Cathedral\\_of\\_Santo\\_Domingo\\_Dominican\\_Republic\\_Determinacion\\_de\\_los\\_colores\\_de\\_la\\_patina\\_aplic](https://www.researchgate.net/publication/325389788_Determining_the_patina_colors_applied_UV-VIS-NIR_spectroscopy_and_Munsell_system_in_the_main_facade_of_the_Cathedral_of_Santo_Domingo_Dominican_Republic_Determinacion_de_los_colores_de_la_patina_aplic), (2019-08-08).

# Hacia una monitorización de barrio

Análisis de la rehabilitación de  
viviendas sociales en Zaragoza

UNIZAR

C. Monné (1), C. Cabello (2)

(1) Dr. Ingeniero Industrial. Profesor Titular de Universidad. Escuela de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de Zaragoza, Zaragoza (España).

(2) Dra. Arquitecta. Arquitecta-Profesora Asociada de Universidad. Escuela de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de Zaragoza, Zaragoza (España).

Persona de contacto/Corresponding author: [cmmb@unizar.es](mailto:cmmb@unizar.es) (C. Monné)

## Hacia una monitorización de barrio

### RESUMEN

Se ha realizado la rehabilitación de la envolvente de unas viviendas sociales sitas en la ciudad de Zaragoza (España). La particularidad principal de la misma ha sido la utilización del SATE como aislamiento. En el presente artículo se muestra el proceso de monitorización de las viviendas, caracterizado por la posibilidad de registrar datos en dos edificaciones similares (en arquitectura, dimensiones y orientación): un bloque rehabilitado y otro no: Esto nos ofrece la posibilidad de poder comparar comportamientos reales en momentos de tiempos similares. Se han registrado valores termodinámicos (temperatura y humedad), de calidad aire (concentración de CO<sub>2</sub>) y de consumo energético (eléctrico y gas). Con los datos registrados durante un año se ha comprobado el confort y la homogeneidad de temperaturas alcanzado en las viviendas aisladas con SATE. Con la experiencia llevada a cabo se plantean las claves de las nuevas monitorizaciones en el barrio para que dichas mediciones sean estrategias de conocimiento y fomento de la rehabilitación a gran escala.

**Palabras clave:** Rehabilitación; SATE; Sistema de Aislamiento Térmico Exterior; Eficiencia energética; Ahorro energético.

## Towards neighborhood monitoring

### ABSTRACT

*The rehabilitation of the enclosure of social housing located in the city of Zaragoza (Spain) has been carried out. The main feature has been the use of the SATE as isolation. This paper shows the process of monitoring homes, characterized by the possibility of recording data in two similar buildings (in architecture, dimensions and orientation): a rehabilitated block and another not: This offers us the possibility to compare real behaviors at times of similar times. Thermodynamic values (temperature and humidity), air quality (CO<sub>2</sub> concentration) and energy consumption (electric and gas) have been recorded. The data recorded for one year have proven the comfort and homogeneity of temperatures achieved in isolated homes with EIFS. With the experience carried out, the keys to the new monitoring in the neighborhood are raised so that these measurements are considered as strategies of knowledge and promotion of large-scale rehabilitation.*

**Keywords:** Rehabilitation; EIFS; Exterior Insulation Finish Systems; Energy efficiency; Energy saving.

## 1. Introducción

La eficiencia energética es una práctica que cada día está cobrando una mayor importancia debido a la creciente preocupación sobre los problemas medioambientales asociados al consumo de energía y empleo de combustibles fósiles. En el ámbito doméstico el consumo de calefacción supone un porcentaje importante del gasto energético nacional. Una gran proporción de la energía empleada en calefacción se pierde a través de los cerramientos mediante conducción. La mejora del aislamiento térmico en el parque residencial existente puede reducir notablemente las citadas pérdidas y por tanto el consumo de energía. Desde la Directiva 2012/27/UE (1) se incita a los países miembros de la Unión Europea a que movilicen inversiones para la renovación de edificios residenciales de forma que mejoren su rendimiento energético.

Desde la estrategia a largo plazo para la rehabilitación energética en el sector de la edificación en España (ERESEE) (2) se plantea que es necesario aumentar el ritmo de renovación del parque existente residencial ya que constituye un sector con un potencial de ahorro energético crucial para alcanzar los objetivos de la Unión de reducir los gases de efecto invernadero entre un 80% y una 95% para el 2050 respecto a 1990.

La monitorización de edificios rehabilitados permite comprobar si las soluciones técnicas empleadas son las adecuadas, si los ahorros energéticos son los previstos y calcular con exactitud la amortización de las inversiones llevadas a cabo en estas obras. Además de ser una herramienta de difusión para técnicos y administraciones de las ventajas que tiene la mejora energética de la envolvente de los edificios y de sus instalaciones, fomentando de esta manera la rehabilitación de edificios. Esta tecnología permite comprobar los niveles de confort térmico y el ahorro en las facturas que experimentan los propietarios y usuarios de las viviendas renovadas. La Directiva UE 2018/844 (3) relativa a la eficiencia energética de edificios establece que pueden estar equipados con sistemas de monitorización que mida la eficiencia de las instalaciones para informar a propietarios y administradores de anomalías y reducciones de gasto llevadas a cabo por las reformas, pero no incide en que monitorizar significa valorar el ahorro de las mejoras en la envolvente de los edificios.

En el Conjunto Urbano de Balsas de Ebro Viejo, en Zaragoza, se ha llevado a cabo la rehabilitación energética de un bloque de diez viviendas. La posterior monitorización, de este portal y del colindante, de las mismas dimensiones y orientación que permanece en su estado original, ha permitido estudiar, analizar y cuantificar el impacto que supone la mejora del Sistema de Aislamiento Térmico Exterior (SATE) en edificios residenciales. El seguimiento técnico de viviendas similares, en un edificio rehabilitado y en uno en su estado inicial, ha permitido obtener datos relevantes de la mejora energética que supone la rehabilitación de fachadas, cubiertas y carpinterías. Así mismo las mediciones estudiadas han descubierto limitaciones de esta técnica y permite plantear las claves para las nuevas monitorizaciones que se pretenden llevar a cabo a mayor escala en el mismo barrio en nuevos bloques que van a ser rehabilitados energéticamente en los próximos años.

Esta investigación pretende generar conocimiento para transferir a las administraciones, a las empresas y a técnicos y a la ciudadanía en general de que las mejoras energéticas en la envolvente pueden ser un motor en los procesos de regeneración urbana.

## 2. El barrio

### 2.1. Tipos residenciales.

Balsas de Ebro Viejo, situado en el sector del Picarral, en el municipio de Zaragoza (España) es el Conjunto Urbano de interés más extenso y complejo de la ciudad, promovido por la Obra Sindical del Hogar y Arquitectura y terminada su construcción en el año 1969. Sus arquitectos fueron: Alejandro Allanegui, Fausto Gracia Marco, Jesús Guindeo, José Luis de la Figuera y Lorenzo Monclús. Es uno de los 21 grupos de interés de vivienda social que existen en la ciudad y cuyo modelo urbano generado entre los años 50-70 se repite en otras ciudades de España (4) y también de Europa, siendo por ello muy valorados como tipologías edificatorias aptas para la rehabilitación energética y la regeneración de barrios.

Con aproximadamente 1.200 viviendas construidas el conjunto se organiza con siete tipologías de viviendas diferenciadas, tres que se ordenan en bloque y otras cuatro distintas en las torres. Los 47 bloques son de

planta baja más cuatro plantas alzadas, ordenados en dos, tres o cuatro portales de diez viviendas cada uno. Predominan las orientaciones lineales norte-sur, pero algunas de las agrupaciones tienen orientación predominante este-oeste, al definir los viales organizadores de la trama urbana. Las 6 torres tienen planta baja más once plantas: cuatro viviendas por piso orientadas cada una de ellas de forma diferente en las Torres en forma de T y dos por piso en la torre en forma de I, que tiene a su vez dos portales diferenciados. La ordenación urbanística combina torres, bloques lineales, espacios exteriores abiertos y otros usos terciarios tales como tiendas, muchas de ellas cerradas, y equipamientos que activan la vida del sector. En la actualidad el barrio carece de la actividad con la que fue concebido y requiere un impulso que lo revitalice. Además, la totalidad de las viviendas se encuentran obsoletas en cuestiones de accesibilidad y de eficiencia energética.

## 2.2. Otros parámetros definidores.

Se describe en este apartado los elementos de la envolvente original de los edificios; así como los aspectos fundamentales de las actuales instalaciones de A.C.S y Calefacción. Sólo se incide en los bloques, puesto que no se prevé rehabilitaciones energéticas de las Torres en un corto plazo. Se enumeran también los perfiles de uso más frecuentes hoy en día en este grupo sindical. Esto es, se trata de detallar aquellos condicionantes que pueden determinar la configuración de las nuevas monitorizaciones que se plantean, y que han sido determinantes en la monitorización llevada a cabo en el bloque rehabilitado.

En relación con la envolvente original, y como corresponde al 1969, año de construcción, la envolvente de todos los edificios de Balsas carece de aislamiento en todos sus elementos. La fachada predominante en todos los tipos de viviendas (tanto los bloques como las torres) está compuesta por hoja exterior de ladrillo caravista (12,5cms.), jarreado en la cara interior con mortero de cemento, cámara sin ventilar (3cms.) y trasdosado de tabique de ladrillo sencillo (5,5cms.) enlucido con yeso. Se observa una diferencia entre los bloques de Tipología 3 y el resto, puesto que la fachada principal funciona además de como cerramiento como pared de carga estructural; no se han realizado catas para

comprobar si la solución constructiva de la envolvente en este caso es diferente y pudiera tener un comportamiento térmico distinto. La tipología de bloques y viviendas se corresponde con la descrita en el Documento de Coordinación del barrio (5).

Las cubiertas inclinadas, en los bloques, se resuelven con forjado plano, tabiquillos conejeros y acabado con teja curva árabe. La carpintería original era de madera con vidrio simple, aunque ha sufrido muchas modificaciones a criterio de cada uno de los usuarios de las viviendas. Predomina la carpintería de aluminio con cámara sin rotura al puente térmico.

La producción de agua caliente para las instalaciones de calefacción, en los bloques, es individual. Varía según los portales, pero algo más de la mitad de los usuarios disponen de caldera mixta individual de gas. El resto resuelven la calefacción y el agua caliente sanitaria con radiadores y termos eléctricos.

En el caso de las instalaciones de gas, algunos de los usuarios disponen de nuevos contadores que permiten su lectura por control remoto. Para la medición de energía eléctrica es más extendido en el barrio el uso de contadores inteligentes que pueden ser monitorizados. Salvo en el portal rehabilitado, los contadores de gas y eléctricos no están centralizados.

Han sido concluyentes en la estructura de la monitorización efectuada el perfil del usuario, siendo determinante tanto la Figura del propietario de la vivienda, como del arrendatario de esta. Tras la gestión “puerta a puerta” que se ha llevado a cabo con el fin de animar a las Comunidades de vecinos a realizar rehabilitaciones energéticas de sus edificios, en términos generales tres son los tipos de usuarios de las viviendas:

- Propietarios, personas mayores de 65 años, que corresponden con los primeros pobladores del barrio. Diferenciamos entre jubilados activos que se consideran líderes naturales de los procesos de rehabilitación y mayores de 80 años con problemas importantes de movilidad reducida.
- Propietarios, hijos de los primeros habitantes de balsas, propietarios de nuevas casas, residentes de forma individual o en familia. Su papel es clave en la activación de los procesos de regeneración del sector.
- Inquilinos, jóvenes en su mayoría, con hijos, con recursos económicos intermedios. Muchos de ellos



proviene de otros países. Algunos estudiantes, dada la proximidad de la Universidad.

El perfil del usuario de la vivienda es muy relevante a la hora de decidir si una vivienda forma o no parte de la muestra a monitorizar. Muchas veces los usuarios son válidos, pero no están dispuestos a aceptar un cierto seguimiento, aunque este persiga un conocimiento que se quiere transferir a la sociedad. En todo caso, si los tipos elegidos no son perfectamente comparables los resultados se han de ponderar con unos factores de corrección difíciles de establecer. En las monitorizaciones de edificios, la elección de los usuarios es muy relevante ya que acarrea una gran contribución a la incertidumbre de los resultados tal y como expone la Unidad de Eficiencia Energética de la Edificación del CIEMAT en el Proyecto OMEGA-CM (6)

### 3. Edificio C/ Peña Oroel nº 2.

#### 3.1. Características Rehabilitación integral.

Entre Junio 2018 a Enero del 2019 el portal sito en la C/ Peña de Oroel nº 2 fue rehabilitado integralmente. Tras las obras se monitorizaron dos de los portales que constituían este edificio, el rehabilitado y el colindante sin modificar. La investigación se centró en la toma de datos de dos viviendas sin rehabilitar y cuatro rehabilitadas. Los dos inmuebles fueron construidos originalmente con unas características iguales en cuanto a tamaño, forma y materiales, tal y como se ha descrito en el apartado anterior.



Figura 1. Imagen del edificio rehabilitado. Fachada Sur –izquierda- y Norte –derecha- (Fotos: Iñaki Bergera)

Se ha elegido para esta investigación el edificio mencionado porque permite estudiar adecuadamente el impacto de la rehabilitación energética sobre el consumo de energía de las viviendas, al disponer de dos inmuebles equivalentes en orientación, disposición y materiales constructivos de origen, con la diferencia de que uno de ellos ha sido aislado térmicamente (rehabilitado con SATE) y el otro no. Esto ofrece unas condiciones que permiten la comparación rigurosa del consumo de energía y el comportamiento térmico entre las viviendas originales y rehabilitadas.

Las actuaciones realizadas en la rehabilitación integral del edificio son la supresión de barreras arquitectónicas mediante la colocación de un ascensor en un volumen exterior y la remodelación de la entrada y de la escalera; la rehabilitación energética de la envolvente y obras de conservación e instalaciones derivadas de las dos actuaciones anteriores.

En la Figura 1 puede verse el edificio rehabilitado.

### **3.2. Rehabilitación energética de la envolvente.**

La falta inicial de aislamiento en la totalidad de la envolvente da lugar a una situación de desconfort generalizada en los usuarios y un consumo energético excesivo del edificio.

En las tres fachadas del edificio se dispone aislamiento por el exterior mediante el sistema REDArt Adhesivo "Rockwool", anclado a la hoja exterior de la fachada de ladrillo caravista macizo. El aislamiento está formado por lana de roca de 80mm. en todo el perímetro del edificio en lo que constituye la envolvente de las viviendas. Los paneles son de lana de roca de doble densidad ( $150 \text{ kg/m}^3$  en la cara superior y  $95 \text{ Kg/m}^3$  en la capa inferior).

Los pilares que resaltan 5 cm en el plano de la fachada se han revestido con el mismo sistema. Las jambas, alféizares y dinteles de los huecos de las ventanas que se han sustituido y no llevan contraventanas se han revestido con el mismo sistema de lana de roca de alta densidad ( $155 \text{ kg/m}^3$ ) de 20mm de espesor.

En el cerramiento de la nueva caja de escalera y del ascensor se colocan 50mm de paneles semirrígidos de lana de roca de  $40 \text{ kg/m}^3$  de densidad, acabados con chapa metálica grecada. En el encuentro del nuevo volumen acabado en chapa con el edificio existente se coloca el sistema REDArt de Rockwool por el exte-

rior para garantizar la continuidad del aislamiento en la envolvente del edificio. El mismo criterio que en los huecos de las fachadas existentes se ha tenido en los contornos de los huecos del nuevo volumen.

En la zona de las galerías de las cocinas, donde las diferentes reformas individuales habían generado un cierto desorden en la fachada, se demuele parte del cerramiento y se construye de nuevo aislándolo por el exterior y generando una uniformidad en los huecos.

La cubierta del edificio existente se aísla con mantita ligera de lana de roca de 120mm. (Ursa Glasswool) de 120mm., con conductividad térmica  $0,04 \text{ W/mK}$ ., revestida por una de sus caras con papel Kraft que actúa como barrera de vapor, instalada sobre la falsa del último forjado horizontal entre los tabiquillos palomeros. Las nuevas cubiertas del volumen del ascensor son invertidas resueltas con panel de poliestireno extruido de 80mm., con conductividad térmica de  $0,036 \text{ (W/mK)}$ .

El encuentro de las cámaras sanitarias con la fachada también se ha aislado. En el zócalo del edificio se ha dispuesto paneles rígidos de poliestireno extruido, de superficie rugosa acanalada, de 40mm. de espesor, con resistencia térmica  $0,04 \text{ w/mK}$ .

Se ha perseguido en la definición de las soluciones constructivas la no existencia de puentes térmicos en la envolvente rehabilitada.

En Zaragoza sólo se conoce un precedente de monitorización de vivienda social antes y después de ser rehabilitada energéticamente. El estudio se enmarcó en el proyecto LIFE "New4old" (LIFE 10ENV/ ES/ 439) y dos edificios de tipología característica del casco viejo de la ciudad fueron empleados como demostradores. Las mediciones y el análisis lo llevaron a cabo un grupo de investigación de la Universidad de Madrid entre 2013-2015. Las obras, dirigidas por las arquitectas E. Román, G. Gómez, y Margarita de Luxán, se acabaron en el 2014. Los resultados del estudio indican que con la incorporación de un aislamiento por el exterior mediante 5cm. de poliestireno expandido en las fachadas, 12 cm. de fibra de vidrio en las cubiertas, la mejora de las carpinterías y la implementación de energías renovables y medidas pasivas de sombreado en la fachada sur, se conseguían ahorros del del 70% en la demanda y del 25% del consumo real (7).

## 4. Equipos de medida y monitorización

En el caso del edificio Oroel 2-4, para analizar la influencia real del aislamiento de la envolvente en el consumo y en el confort de las viviendas, es necesario disponer de un histórico de datos de las variables termodinámicas y energéticas que cuantifiquen las condiciones de calidad de aire en el interior de las viviendas y su comportamiento energético.

Los sensores instalados deben registrar los siguientes parámetros:

- Consumo eléctrico
- Consumo de gas
- Condiciones interiores: temperatura, humedad, concentración de CO<sub>2</sub>
- Condiciones exteriores: temperatura, humedad, concentración de CO<sub>2</sub>

Se monitorizarán los datos de las variables anteriormente mencionadas durante el año 2019, de manera que se pueda realizar una comparativa temporal, y así poder investigar el efecto del aislamiento tipo SATE en el consumo de energía y en el confort de los residentes.

### 4.1. Sistema de monitorización.

En este apartado se recoge la relación de equipos seleccionados para realizar la monitorización de consumo de energía y condiciones de confort en las viviendas.

Para el proceso de selección se han tenido en cuenta las características y dimensiones del edificio, el alcance de la señal inalámbrica de los equipos, las particularidades de los contadores y el coste económico del conjunto de equipos necesarios para monitorizar las variables a estudio. Adicionalmente se ha buscado evitar las posibles molestias a los residentes causadas por la instalación de equipos en el interior de sus viviendas.

Todos los contadores eléctricos existentes en el edificio son del tipo CERM1, que disponen de comunicación del histórico de consumo y de comunicación del consumo en tiempo real mediante pulsos ópticos (mediante el protocolo de comunicación IEC 62056-21), se opta por ese último método para realizar la lectura automática de la medición de consumo eléctrico, ya que de esta manera se obtienen datos en tiempo real y se evita la necesidad de realizar visitas periódicas a la instalación para recolectar el histórico de datos.

En cuanto a contadores de suministro de gas se encuentran dos modelos en el edificio Kromschroeder NB-4D y Kromschroeder BK-G4M. Se ha descartado realizar la medición del consumo en los primeros ya que solo disponen de comunicación óptica y debido al mal estado del visor del contador no resulta fiable su medición.

Una vez determinado el tipo de contador de gas a monitorizar y el sistema de comunicación del consumo eléctrico, se han estudiado diferentes combinaciones de sensores con objeto de monitorizar todas las variables requeridas en esta investigación. Tras valorar distintas soluciones teniendo en cuenta el coste económico y características técnicas (alcance, autonomía, precisión,...) se ha optado por la solución completa ofrecida por el distribuidor Cliensol Energy S.L. ya que cubre todas las necesidades técnicas relacionadas con la monitorización y al mismo tiempo, al obtener todos los dispositivos desde un mismo proveedor se reducen los tiempos de entrega y costes asociados al transporte, además de centralizar el acceso a los datos medidos desde una única plataforma, facilitando su gestión y evitando costes adicionales debidos a la suscripción a diferentes plataformas de gestión de datos

Los dispositivos de medida y equipos auxiliares seleccionados para instalar en el edificio son:

- Siete sensores de aire (temperatura, humedad y CO<sub>2</sub>), de los cuales seis se emplean en las viviendas y uno en el exterior (modelo Airsense)
- Cuatro sensores de consumo de gas (modelo Relaysense)
- Tres sensores de consumo eléctrico en enchufe para diferenciar el consumo de un electrodoméstico en particular (aire acondicionado o radiador eléctrico) del consumo total de la vivienda (modelo Plugsense)
- Seis sensores de consumo eléctrico de contador (modelo Optosense)
- Tres parejas de gateway y router que reciben la señal de los sensores y la comunican a través de internet (modelo Energobox y Router)

El registro de los datos se realiza cada minuto.

En la monitorización de las viviendas la disposición de estas dentro del edificio, el tipo de generador de calor y los contadores de medición de consumo fueron facto-

res determinantes. Pero sin duda la disponibilidad de los usuarios marcó las líneas generales de esta investigación. No se monitorizaron viviendas situadas en planta baja, que son un tipo característico del barrio y con unos condicionantes térmicos particulares que conviene estudiar al situarse sobre la cámara sanitaria. Los resultados obtenidos de las monitorizaciones efectuadas, así como sus limitaciones nos van a permitir organizar las claves para hacer eficaces las nuevas monitorizaciones.

No ha sido posible hasta la fecha comparar los datos obtenidos en las mediciones de lectura remota con simulaciones o auditorías energéticas, a la manera del proyecto ME3A (8), aspectos que podrían tenerse en cuenta en las próximas monitorizaciones en el Barrio de Balsas de Ebro Viejo.

## 5. Resultados

Para estudiar el comportamiento de las viviendas rehabilitadas se ha monitorizado durante un año sus variables termodinámicas.

Se presentan los resultados obtenidos de la investigación examinando el comportamiento de pisos térmicamente equivalentes de los 2 edificios: el rehabilitado, piso 4ºD de Peña Oroel nº2, y el no rehabilitado, piso 4ºI de Peña Oroel nº4 (temperaturas y consumo de gas).

### 5.1. Comportamiento estacional

En un análisis estacional se puede estudiar el comportamiento medio de las viviendas y analizar las ventajas y bondades que tiene la rehabilitación propuesta. Los estudios con mayor plazo temporal permiten amortiguar los efectos puntales y generar una homogeneidad estadística de los datos registrados.

Se presentan los datos registrados en los meses fríos y cálidos: Febrero 2019 (Fig. 2) y Junio 2019 (Fig. 3). En las figuras se observa cómo evoluciona la temperatura exterior y cómo responden a esta condición las viviendas rehabilitadas (Peña Oroel nº2 4D y la no rehabilitada Peña Oroel nº4 4I).

En las viviendas rehabilitadas se ha registrado, durante Febrero, una temperatura media en el interior de estas de 21,09°C, temperatura de confort según el RITE, con una desviación estándar de 0,96, lo que indica gran

estabilidad térmica, cuando la temperatura media en el exterior ha sido de 12.07°C, con una desviación de 3,96.

Las viviendas de Peña Oroel nº2 no poseen ningún sistema activo de refrigeración. La estabilidad térmica durante el verano en el interior de la vivienda que muestra (Fig. 3) es debida a la inercia térmica producida por el aislamiento exterior. El edificio mantiene una temperatura media similar a la exterior (25,67°C), con una oscilación térmica considerablemente inferior. La desviación estándar de los registros de la temperatura interior de las casas es inferior al 25% (en torno al 2 frente al 6,47) del que posee la temperatura exterior.

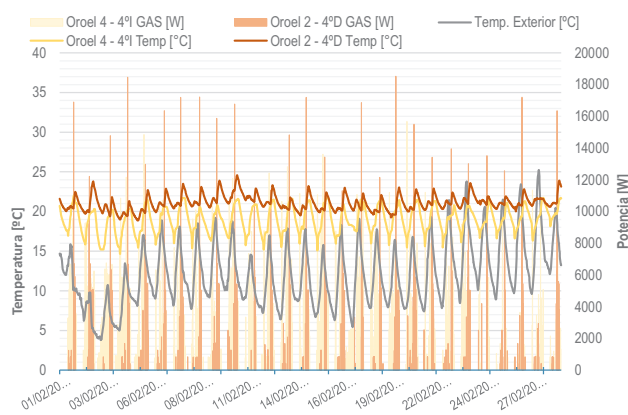


Figura 2. Registros durante el mes de febrero de 2019.

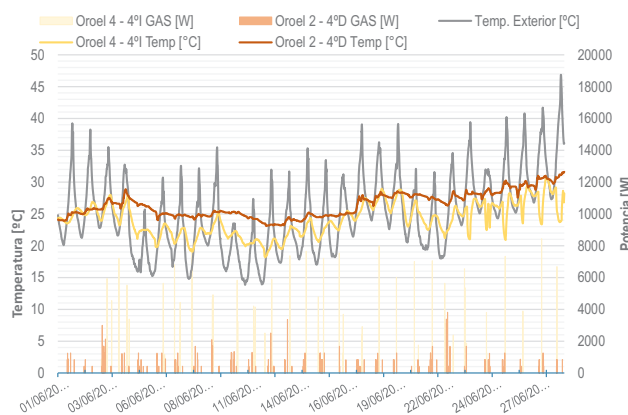


Figura 3. Registros durante el mes de junio de 2019

## 6. Conclusiones

La conclusión importante que podemos obtener del estudio es el confort y la homogeneidad de temperaturas alcanzado en las viviendas aisladas con SATE.

Se ha podido comprobar la eficacia de las inversiones económicas llevadas a cabo en la rehabilitación energética del edificio rehabilitado en Oroel nº 2 cuyo ahorro medio de la energía de calefacción está por encima del 50% comparado con el edificio no rehabilitado colindante. Además, dicho ahorro es mucho mayor en las viviendas dispuestas en el centro del edificio que las ubicadas bajo la cubierta.

Las conclusiones de la monitorización realizada indican el valor de poder medir con rigor la eficiencia energética y los ahorros de las medidas aplicadas en la rehabilitación energética de los edificios. Para un conocimiento completo de las estrategias a seguir en la rehabilitación de Balsas de Ebro Viejo es necesario seguir haciendo monitorizaciones en base a los resultados obtenidos en el estudio realizado.

## 7. Hacia una monitorización de barrio

Se prevé la rehabilitación energética de 100 viviendas más en el Barrio, tras la Convocatoria de Ayudas a la Rehabilitación (2019) de la sociedad municipal Zaragoza Vivienda, que van acompañadas de una estrategia de seguimiento técnico de dichas actuaciones mediante una monitorización en un ámbito amplio. Si bien el Código Técnico de la Edificación establece criterios de no empeoramiento y flexibilidad a la hora de intervenir en edificios existentes, se pretende buscar en las nuevas obras rangos de prestaciones próximos a los edificios de nueva planta, esto es, niveles de eficiencia muy altos. Y los índices de desviación respecto estos valores han de poder medirse, así como la procedencia de las fuentes de generación de energía.

El punto de partida de la investigación actual está en tratar de establecer cómo debe de ser esa monitorización de forma que los valores obtenidos nos den una medición exacta próxima a la realidad de los edificios y las rehabilitaciones energéticas que se lleven a cabo, en cuanto al consumo de energía y los ahorros y disminu-

ción de GEI que generan las obras de rehabilitación.

Las nuevas obras que se pretenden se sitúan en todas los tipos de viviendas que se dan en los bloques del barrio, cualquiera que sea su disposición dentro del edificio y su orientación.

Teniendo como referencia la obra llevada a cabo en Oroel 2, y los resultados obtenidos de la monitorización y análisis que ha realizado la Universidad de Zaragoza en este edificio, las nuevas propuestas de los estudios de Arquitectura estudian soluciones constructivas de mejora de la envolvente que minimicen los puentes térmicos característicos de los bloques de Balsas: encuentros con aleros de cubierta, encuentros de pilares y forjados, puente térmico de las losas de balcón, contorno de los huecos y encuentros con los forjados que separan las cámaras sanitarias.

Uno de los aspectos que va a permitir la muestra amplia que se puede analizar es conjugar mejor los factores de análisis:

Disposición de viviendas, orientación, soluciones constructivas de la rehabilitación, sistemas de calefacción y perfiles de usuario. La búsqueda de las viviendas más adecuadas para ser comparadas (además de la medición de todas las variables estudiadas en Oroel nº 2) y la introducción de otros aspectos de tipo social (facturas o encuestas a los usuarios) permitirán un seguimiento más completo.

En el próximo año se va a contar en el Barrio de Balsas de Ebro Viejo con un buen laboratorio experimental en el que poder realizar monitorizaciones, mediciones y análisis comparados, superponiendo elementos constructivos de la envolvente de los edificios antes y después de rehabilitar, y además con diferentes condiciones de orientación y exposición al viento y distintas soluciones innovadoras. La monitorización nos permitirá evaluar soluciones reales aplicadas, caracterizando el potencial de mejora de la calidad ambiental interior y la reducción de la demanda energética en las viviendas, a la manera de la propuesta metodológica que define C. Alonso en su tesis doctoral (9).

Se plantea para esta monitorización de carácter amplio un sistema de monitorización basado en dispositivos de medida con transmisión de radio mediante protocolo LoraWAN, con las siguientes ventajas: largo alcance (entre 2 y 15 km), consumo mínimo de batería

(vida útil de varios años), comunicaciones cifradas, utilización de frecuencias que no requieren licenciamiento, instalación sin cables y estándar abierto (compatibilidad entre dispositivos), en la búsqueda de la solución más adecuada y exacta en cuanto a mediciones y coste económico para los usuarios de las viviendas. Código Abierto. Se pretende seguir el protocolo UNE-EN ISO 7726: 2002.

El seguimiento social y técnico de las bolsas de parque residencial social susceptible de ser rehabilitado debe analizarse rigurosamente con objeto de establecer la adecuación de las políticas urbanas a las necesidades socioeconómicas de la población (10); y Balsas de Ebro Viejo, por su extensión y características de su población, puede ser un buen laboratorio y la medición real imprescindible para comprobar resultados.

## 8. Agradecimientos

El desarrollo de esta investigación se enmarca en el contrato OTRI 2018/0640 entre la Universidad de Zaragoza y la empresa ROCKWOOL Peninsular S.A.U. Quisiéramos los autores agradecer a la compañía su gran colaboración.

## 9. Bibliografía

- (1) Directiva 2012/27/UE relativa a la eficiencia energética. Parlamento Europeo y Consejo, L 315, de 25 de octubre del 2012, pp.1-56. Recuperado de: <https://www.boe.es/doue/2012/315/L00001-00056.pdf>
- (2) De la estrategia a largo plazo para la rehabilitación energética en el sector de la edificación en España. Gobierno de España, Ministerio de Fomento, Actualización ERESEE 2017, pp.1-71. Recuperado de: [https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/es\\_building\\_renov\\_2017\\_es.pdf](https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/es_building_renov_2017_es.pdf)
- (3) Directiva 2018/844 /UE relativa a la eficiencia energética de los edificios. Parlamento Europeo y Consejo, L156, de 30 de mayo del 2018, pp.75-91. Recuperado de: <https://www.boe.es/doue/2018/156/L00075-00091.pdf>
- (4) Cervero N. y Agustín L. (2015). Remodelación, Transformación y Rehabilitación. Tres formas de intervenir en la Vivienda Social del siglo XX. *Informes de la construcción. Vol. 67, Extra-1, mo26*. doi: <http://dx.doi.org/10.3989/ic.14.049>
- (5) Cabello C., Muñoz C. y Molpeceres G. (Septiembre 2019) Documento de coordinación del Conjunto Urbano de Balsas de Ebro Viejo. Actualmente con Aprobación Inicial del Ayuntamiento de Zaragoza.
- (6) Proyecto OMEGA-CM. Medidas de calidad y no intrusivas para la evaluación y optimización energética de edificios existentes con elementos constructivos avanzados. UIE3-CIEMAT. [http://projects.ciemat.es/web/omega-cm/res\\_uie3](http://projects.ciemat.es/web/omega-cm/res_uie3)
- (7) Román E., Gómez G. y De Luxan M. (2017, 28 de Marzo): Rehabilitación de viviendas de alquiler social. Demostrador del Proyecto LIFE “New4old” (LIFE 10ENV/ ES/ 439). Trabajo presentado al 3º Congreso Internacional de Construcción Sostenible y Soluciones Eco-Eficientes.
- (8) Druet L. y Fernández D. (2016, 22 de Junio) Mejora de la eficiencia energética en la edificación a través de la monitorización y auditorías energéticas. Trabajo presentado al III Congreso de Edificios de Energía Casi Nula.
- (9) Alonso C. (2015). Rehabilitación energética de fachadas: *Propuesta Metodológica para la evaluación de soluciones innovadoras, basándose en el diagnóstico de viviendas sociales construidas entre 1940 y 1980* (Tesis Doctoral). Universidad Politécnica de Madrid.
- (10) Hernández-Aja A., Rodríguez I. y Rodríguez R. (2016) Vulnerabilidad Residencial y Dinámicas Inmobiliarias: Del Crecimiento Urbano a la rehabilitación. Trabajo presentado al Congreso Internacional Contested\_Cities, Eje 2: vivienda.

# Monitorización energética y confort en barrios de viviendas sociales en Extremadura

Experiencias en Santa Engracia y  
San Lázaro

INTROMAC

**A. Perianes (1), I. Amigo (2)**

(1) Arquitecta. Técnico de Proyectos. Instituto Tecnológico INTROMAC, Cáceres (España).

(2) Arquitecta. Técnico de Proyectos. Instituto Tecnológico INTROMAC, Cáceres (España).

Persona de contacto/Corresponding author: [angeles.perianes@juntaex.es](mailto:angeles.perianes@juntaex.es)

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7960-6480>

## Monitorización energética y confort en barrios de viviendas sociales en Extremadura

### RESUMEN

Se recogen en este texto las principales experiencias y evolución de enfoques metodológicos en monitorización de barrios de viviendas sociales rehabilitadas energéticamente en Extremadura, concretamente en los barrios de Santa Engracia (Badajoz) y de San Lázaro (Mérida). El objetivo es desarrollar fórmulas que permitan reducir la factura energética y mejorar el confort de los usuarios. A través de estas experiencias se ha desarrollado un sistema de monitorización inalámbrico, de bajo consumo, bajo coste y código abierto que utiliza la tecnología LoRa para comunicar dispositivos.

**Palabras clave:** monitorización; rehabilitación energética; confort; vivienda.

## *Energy monitoring and comfort in neighborhoods of social housing in Extremadura*

### *ABSTRACT*

*The main experiences and evolution of methodological approaches in monitoring neighborhoods of energetically rehabilitated social housing in Extremadura, specifically in the neighborhoods of Santa Engracia (Badajoz) and San Lázaro (Mérida) are collected in this text. The objective is to develop formulas that reduce the energy bill and improve user comfort. Through these experiences, a low-cost, low-cost, open source wireless monitoring system has been developed that uses LoRa technology to communicate devices.*

**Keywords:** *monitoring; energy efficient retrofitting; user comfort; social housing.*



## 1. Introducción

Diferentes actuaciones promovidas desde 2007 por la Junta de Extremadura, a través de la Dirección General de Arquitectura y Calidad de la Edificación han posibilitado avanzar en el conocimiento de las características y necesidades del parque edificado de Extremadura y han demostrado que, para establecer criterios adecuados de intervención para mejorar su eficiencia energética y confort interior, es muy importante realizar mediciones reales y que tengan en cuenta el comportamiento del usuario.

Durante los años 2010 y 2014, a través del proyecto EDEA RENOV, se desarrollaron los proyectos de rehabilitación energética de los barrios de viviendas sociales de Santa Engracia (Badajoz) y San Lázaro (Mérida), que incluyeron la intervención en algunas viviendas piloto y la monitorización de sus consumos energéticos y confort térmico antes y después de la intervención. Se describen a continuación las metodologías de monitorización empleadas.

## 2. Monitorización del Barrio de Santa Engracia

### 2.1. Descripción del barrio

El Barrio de Santa Engracia (1) es un barrio de 800 viviendas ubicadas al Noroeste de Badajoz que se fundó en los años 60 como una unidad vecinal de acogida para las personas que llegaban procedentes de zonas rurales. Todo el barrio tiene la misma tipología de viviendas unifamiliares entre medianeras en hilera, con pequeños quiebros entre ellas. Las viviendas tienen en su mayoría 3 dormitorios, salvo las que están en esquina que poseían inicialmente 4 dormitorios. El 75% de las viviendas son propiedad de sus usuarios y la mayoría han sufrido reformas importantes. Algunas viviendas no cuentan con instalación de agua caliente sanitaria, ni con una red eléctrica actualizada y muy pocas viviendas tienen conexión a internet, por lo que la colaboración con la Asociación de Vecinos, a través de su sede vecinal con conexión a internet, ha sido clave para la monitorización.

Los usuarios cuyas viviendas fueron seleccionadas para ser monitorizadas accedieron previamente a compartir sus datos para comprobar la eficiencia de la intervención y poder recibir asesoramiento para mejorar su consumo y confort.

### 2.2. Tecnología de monitorización

Los criterios (2) para la selección de la tecnología y el sistema de monitorización son:

- Que sea de código abierto, por lo que está basado en la plataforma ARDUINO.
- Que integre sensores de medición de Temperatura, Humedad, Consumo eléctrico y Calidad del aire
- Que sea de bajo coste y un bajo consumo eléctrico
- Que permita la representación de datos mediante programas on-line gratuitos de acceso universal.

Los sensores están conectados a una misma caja de registro donde es transformada la señal al sistema de comunicación MODBUS mediante firmware programado. Una vez transformados, los datos están preparados para poderse enviar al servidor por internet o por radiofrecuencia a través de antenas de repetición.

### 2.3. Esquema de la instalación

La instalación de monitorización del barrio de Santa Engracia está formada por 5 dispositivos repartidos por 4 viviendas y la sede de la asociación de vecinos.

En cada vivienda hay un equipo completo de medida que se muestra en la siguiente Figura 1. El equipo está compuesto por:

- 3 Sensores de medida (Temperatura, Humedad, CO<sub>2</sub> y Consumo eléctrico)
- Caja de registro ubicada en el Salón
- Caja de conversión (situada próxima al cuadro eléctrico)
- Antena de radiofrecuencia (en cubierta).

La posición de los equipos es la misma en todas las viviendas y se colocan a una altura de 2 metros para no entorpecer el paso. El cableado necesario se coloca en superficie para facilitar el posterior desmontaje, ahorrar costes y facilitar su manipulación. Los datos recogidos en cada vivienda llegan por radiofrecuencia a la sede de la asociación de vecinos y desde allí se envían a través de internet a un servidor. Se tiene acceso gratuito on-line a través de un enlace de la plataforma XIVELY. A través

de este enlace se puede acceder a las gráficas de lectura de Temperatura, Humedad, Calidad del aire, Consumo

eléctrico y Potencia eléctrica de cada vivienda. También se pueden descargar los datos en formato tabla.

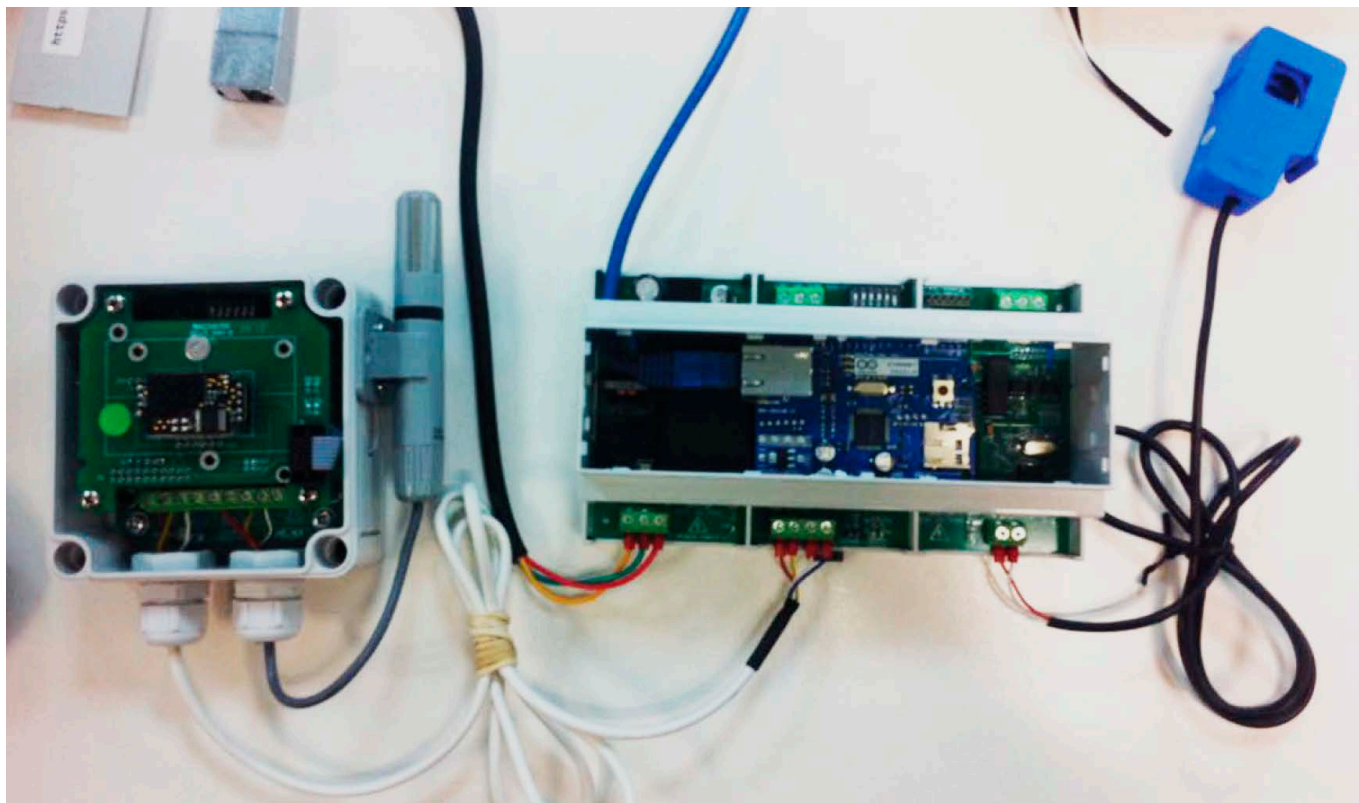


Figura 1. Sistema de monitorización barrio de Santa Engracia

#### 2.4. Resultados obtenidos

Se toman medidas durante el invierno de 2013, antes de la rehabilitación energética de las viviendas, así como durante el año posterior a la intervención. Durante este tiempo se asesora de forma continua a los usuarios para optimizar sus consumos y corregir malos hábitos de uso o detectar deficiencias en las intervenciones realizadas.

Los datos de monitorización obtenidos muestran que de las cuatro viviendas monitorizadas sólo dos de ellas (C/Umbría 8 y C/Gévora 31) mejoran notablemente su eficiencia energética gracias a la combinación de la rehabilitación energética y un uso adecuado de la vivienda y sus instalaciones. La vivienda de C/Ebro 25 presenta datos de confort y consumo muy bajos, que confirman la situación de pobreza energética de sus usuarios. La vivienda de C/Ebro 2 presenta sin embargo consumos muy altos y con valores de confort muy inferiores a las demás, los motivos principales son so-

bre ventilación en invierno, falta de uso de protecciones solares en verano, uso de electrodomésticos muy ineficientes, calefacción mediante resistencias eléctricas y sistemas de iluminación incandescente.

### 3. Monitorización del Barrio de San Lázaro

#### 3.1. Descripción del barrio

Se trata de dos promociones construidas a principio de los años 90, compuestas por 89 viviendas de dos tipologías diferentes: una de viviendas en bloque y la otra de viviendas adosadas (3). Se realiza un proyecto de rehabilitación completa del barrio donde se desarrollan simulaciones energéticas que tomarán como datos de partida los datos recogidos en la monitorización. Se seleccionan 4 viviendas a monitorizar, dos de cada tipolo-

gía con la misma orientación y condiciones de entorno para poder comparar los datos de monitorización. Para comprobar el alcance de las mejoras implementadas se rehabilitan energéticamente dos viviendas y se monitorizan las cuatro.

### 3.2. Sistema de monitorización EFICIEX

Se desarrolla un novedoso sistema de monitorización denominado EFICIEX (4), cuyos principales objetivos son:

- Abaratar el sistema de medición por debajo de los 300 euros/vivienda
- Reunir mediciones de confort y consumo energético de la vivienda: consumo eléctrico, de gas, de agua y la medición de temperatura, humedad y calidad del aire.
- Sistema inalámbrico.
- Desarrollo de un servidor que almacene los datos de monitorización y que contenga información actualizada de precios de agua, electricidad y combustibles.
- Desarrollo de aplicaciones para dispositivos móviles (Android y iOS) para el asesoramiento energético a los usuarios.

Para diseñar y generar el firmware de los dispositivos desarrollados se utiliza la plataforma de código abierto Openenergymonitor.

En la siguiente Figura 2 se muestra el sistema de monitorización EFICIEX, que se basa en las tecnologías de código abierto: Raspberry Pi, Arduino.

Raspberri Pi es un ordenador de placa reducido, de tan solo 30euros que funciona como estación base del sistema de monitorización. Esta base se conecta a internet y envía datos en tiempo real al servidor además de almacenar datos en su memoria.

Arduino es una plataforma de hardware libre, basada en una placa con un microcontrolador que sirve de base para los diferentes sensores: calidad de aire, temperatura y humedad, consumo eléctrico, consumo de agua y de gas.

### 3.3. Base de datos y servidor

Para la gestión y servicio del sistema de monitorización se ha alojado la aplicación EMONCMS desarrollada por el colectivo Openenergymonitor (5) dentro de un servidor propio de la Junta de Extremadura, desde el que se pueden realizar las siguientes gestiones:

- Dar de alta a nuevos usuarios
- Consultar datos actuales del sistema de monitorización (con usuario y contraseña)
- Consultar los datos históricos mediante gráficas en el panel de mandos
- Actualizar precios relacionados con la energía para la aplicación de EFICIEX.



Figura 2. Sistema de monitorización EFICIEX. De izquierda a derecha: Sensor de confort interior (temperatura, humedad y calidad del aire); Sensor de confort exterior (temperatura y humedad); Estación base (Raspberry Pi); Sensor de consumo de agua-gas y consumo eléctrico.

### 3.4. Instalación y montaje

Los únicos sensores que requieren montaje son los de consumo eléctrico y consumo de agua y gas, ya que el resto de sensores son inalámbricos. La medición del consumo eléctrico se realiza mediante una pinza amperimétrica que se aloja en el cuadro eléctrico de la vivienda.

El montaje de los sensores de agua y gas en caldera de butano es enroscado, no requiere ninguna soldadura ni obra y se alimenta con pilas. El sensor de confort interior va enchufado a un enchufe y el sensor de confort exterior va apoyado donde se desee y se alimenta con pilas.

### 3.5. Aplicación móvil

Se desarrolla una aplicación que pone al alcance del usuario información sobre su consumo energético convertido a euros, gráficas que facilitan la comprensión de datos y la recepción de alertas con recomendaciones de uso. La información que requiere la aplicación de parte del usuario son:

- 1- Contraseña API de 32 dígitos de su sistema de monitorización EFICIEEX.
- 2- Potencia eléctrica contratada (actualmente sólo se contemplan instalaciones monofásicas).
- 3- Tipo de combustible para calentamiento de ACS o calefacción: gas natural, propano, butano, gasóleo o biomasa.

Con esta información, la aplicación gestionará la base de datos remotamente gracias a sus permisos otorgados por la contraseña API de 32 dígitos facilitada por el usuario. Si existiera algún problema durante la configuración la aplicación tiene un correo de contacto donde poder hacer cualquier tipo de consulta.

## 4. Otras Experiencias

Otras experiencias en monitorización de edificios y barrios tienen su desarrollo a través de la transferencia plurianual EDEA-CICE (6) a favor del Instituto Tecnológico de la Construcción INTROMAC mediante la que se financia el desarrollo del Área de fomento de la calidad, eficiencia energética y energías renovables, en el ámbito de la Dirección General de Arquitectura y Calidad de la Edificación de la Consejería de Movilidad, Transporte y Vivienda de la Junta de Extremadura.

Concretamente junto con la empresa RAY Ingeniería Electrónica se han desarrollado unos kits de monitorización de código abierto, inalámbricos, de gran alcance en cuanto a las comunicaciones entre dispositivos y basados en la tecnología LoRa, denominados Kit LoRa-EDEACICE.

LoRa es una tecnología que utiliza el espectro de frecuencia sin licencia como parte de la banda de radio ISM (Industrial, Científica y Médica). Para utilizar la tecnología Lora con el fin de comunicar dispositivos IoT existen dos alternativas: a través de redes privadas, o a través de operadores como LoraWAN.

Los Kit LoRa-EDEACICE están en fase de testeo post-prototipado sus funcionalidades y operatividad van a ser testeados por socios de la Red Monitor.

## Bibliografía

- (1) Proyecto EDEA-RENOV. *Proyecto de Rehabilitación del Barrio de Santa Engracia*. Recuperado de: <http://www.edeacice.juntaex.es/edeas-renov/>
- (2) Proyecto EDEA-RENOV. *Monitorización del Barrio de Santa Engracia*. Recuperado de: <http://www.edeacice.juntaex.es/edeas-renov/>
- (3) Proyecto EDEA-RENOV. *Proyecto de Rehabilitación del Barrio de San Lázaro*. Recuperado de: <http://www.edeacice.juntaex.es/edeas-renov/>
- (4) Proyecto EDEA-RENOV. *Monitorización del Barrio de San Lázaro*. Recuperado de: <http://www.edeacice.juntaex.es/edeas-renov/>
- (5) Plataforma Openenergymonitor  
<https://openenergymonitor.org/>
- (6) Convenio EDEA-CICE, Junta de Extremadura (DOE nº 18, de 25 de enero de 2018)





