

# 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 sempiternos, 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.

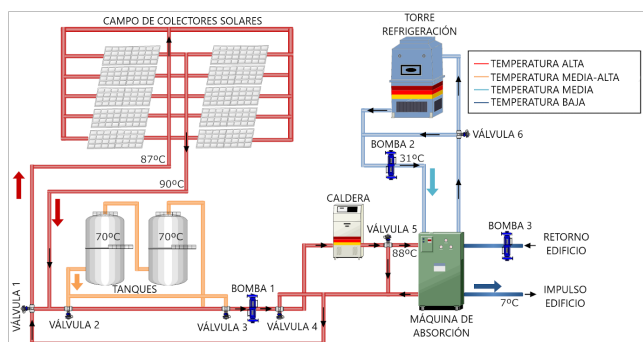


Figura 2. Sistema de climatización basado en frío solar

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.

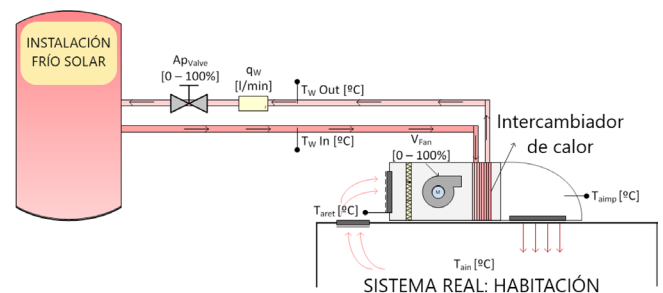


Figura 3. Esquema de un fancoil

### 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).

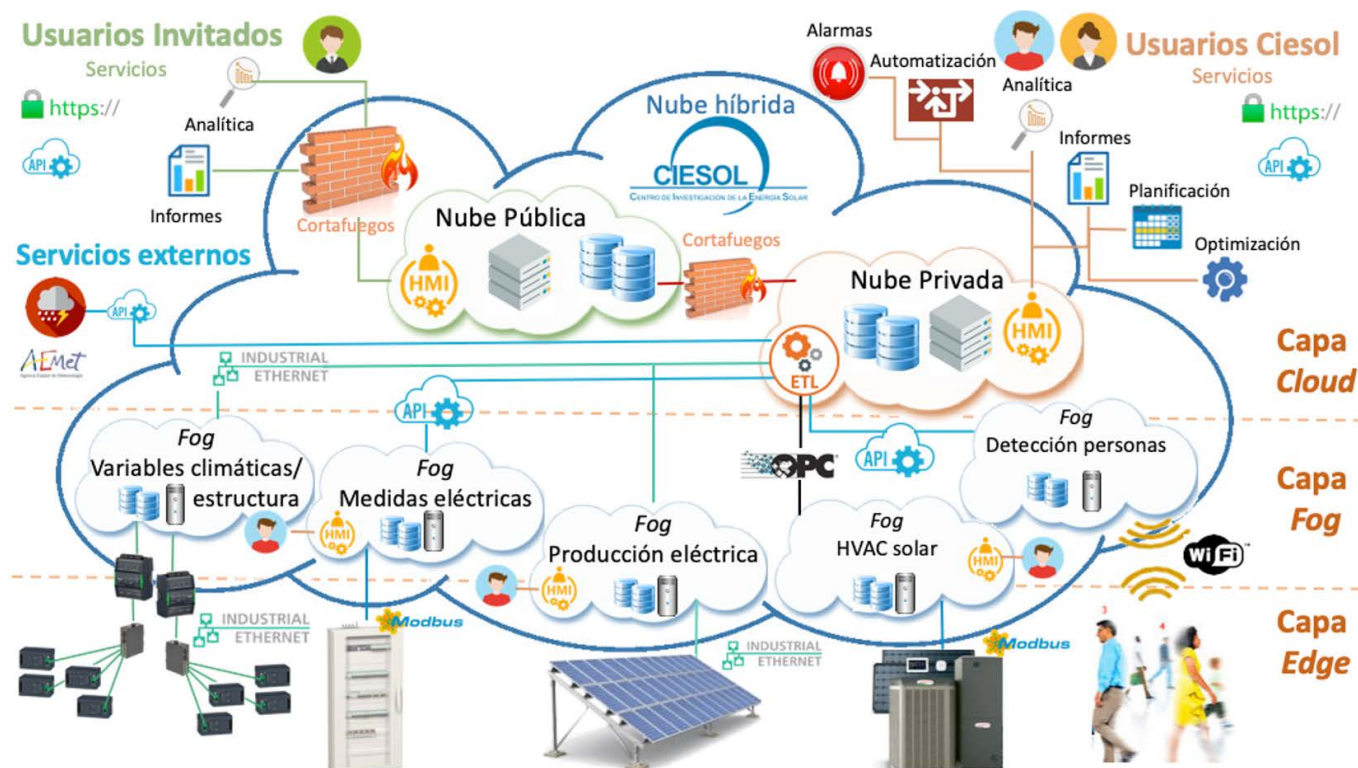


Figura 4. Arquitectura del sistema SCADA del edificio CIESOL



## 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.

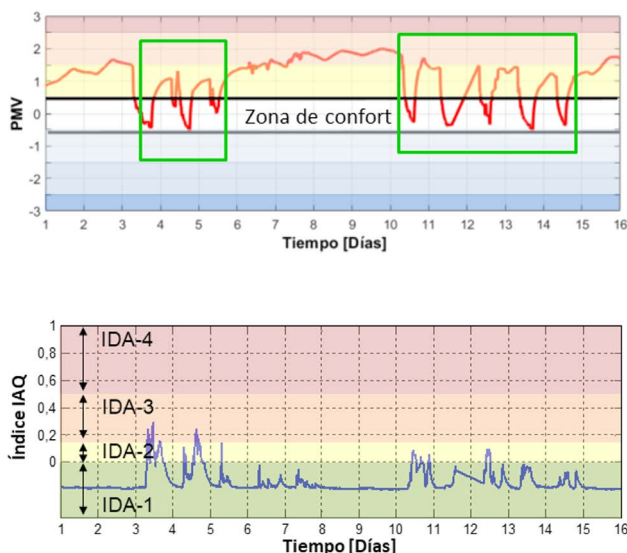


Figura 5. Uso de variables climáticas para determinar el confort de los usuarios: confort térmico y calidad de aire

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.

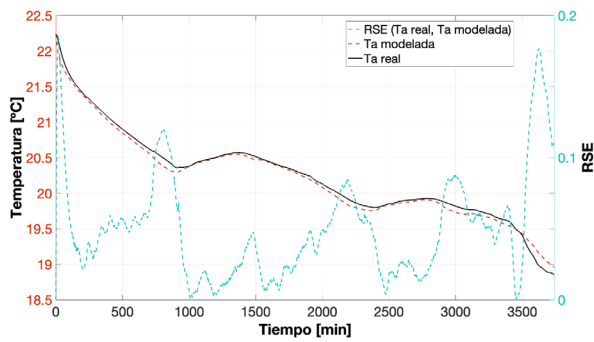


Figura 6. Modelado de la temperatura interior de un laboratorio

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.

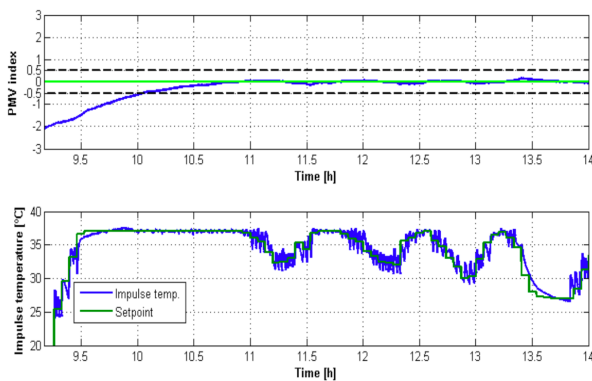


Figura 7. Resultados del controlador MPC

### 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.

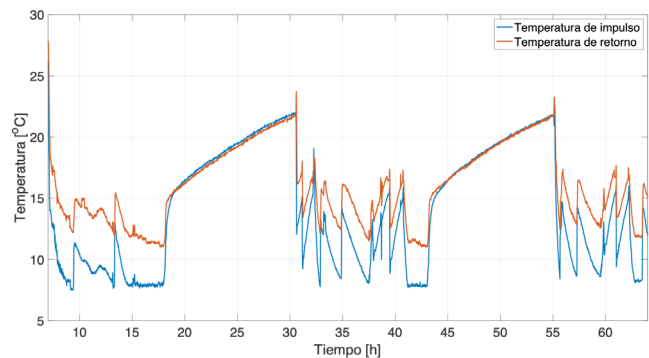


Figura 8. Temperaturas de impulso y retorno del sistema de frío solar en tres días típicos de verano

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.

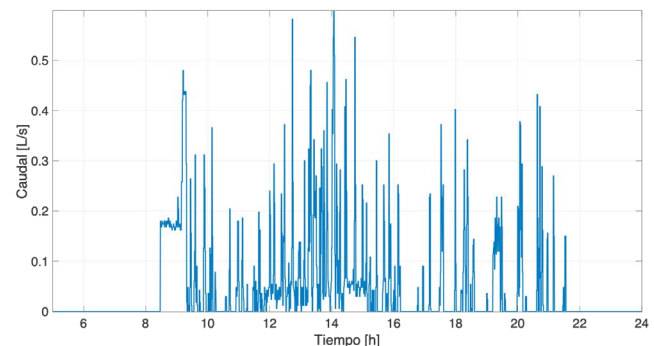


Figura 9. Demanda de agua del edificio.

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.

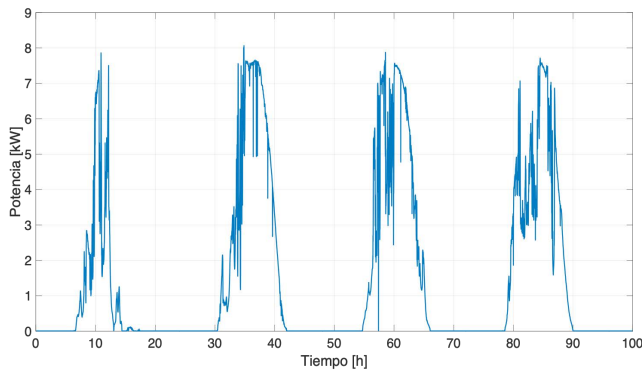


Figura 10. Potencia generado total por la instalación fotovoltaica durante cuatro días de operación típicos.

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/>



**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.