ANALES de Edificación

Anales de Edificación
Vol. 6, Nº3, 27-34 (2020)
ISSN: 2444-1309
Doi: 10.20868/ade.2020.4612

Received: 07-11-2020
Accepted: 10-11-2020

Metodología para mejorar el confort y la calidad del aire en edificios públicos con tecnología de bajo coste.
Methodology to improve comfort and air quality in public buildings with low-cost technology.

Beatriz Montalbán Pozas, Beatriz Muriel Holgado, Marta Lucas Bonilla

[a] Departamento de Construcción, Universidad de Extremadura, Cáceres, España, http://comphas.unex.es/comphas/

***Resumen*— Este artículo presenta una metodología para mejorar la calidad del aire y el confort higrotérmico en edificios públicos mediante el uso de un sistema de monitoreo de código abierto, escalable y de bajo costo y mediante la participación de los usuarios. Esta metodología ha sido probada en cuatro edificios públicos de similares características arquitectónicas y uso, construidos con construcción tradicional, actualmente utilizados como Ayuntamientos, y ubicados en la misma zona climática de la provincia de Cáceres (Extremadura, España). Durante los 12 meses del proyecto, se han instalado sensores en áreas seleccionadas de los cuatro edificios para medir el consumo eléctrico, la temperatura, la humedad y la concentración de CO_2. Los datos recopilados por los dispositivos se enviaron a un servidor alojado de forma remota para su almacenamiento seguro. Las series temporales se analizaron y compararon con las facturas de consumo de energía de los tres años anteriores. Además, se incorporó un estudio de los sistemas de climatización, así como el funcionamiento y ocupación de los edificios por parte de los usuarios. Este análisis generó sugerencias para mejorar el confort y la calidad del aire, además de permitir a los usuarios monitorear los datos en tiempo real. Teniendo en cuenta los objetivos marcados, los resultados muestran que es posible cambiar los hábitos de los usuarios, mejorar las condiciones de confort y calidad del aire, y reducir el uso de los recursos públicos aplicando esta metodología y con una inversión muy baja.**

Palabras Clave— Metodología; eficiencia energética; confort; edificio público; bajo coste.

***Abstract*— This paper presents a methodology to improve air quality and hygrothermal comfort in public buildings by using a low-cost, scalable, open-source monitoring system and through users' participation. This methodology has been tested in four public buildings of similar architectural characteristics and use, built with traditional construction, currently used as Town Halls, and located in the same climatic zone in the province of Cáceres (Extremadura, Spain). During the 12 months of the project, sensors have been installed in selected areas of the four buildings in order to measure electricity consumption, temperature, humidity and CO_2 concentration. The data collected by the devices were sent to a remotely hosted server for secure storage. The time series were analysed and compared with the energy consumption bills of the three preceding years. In addition, a study of the climate control systems as well as the operation and occupancy of the buildings by users was incorporated. This analysis led to suggestions for improving comfort and air quality, as well as allowing users to monitor the data in real time. Considering the objectives set, the results show that it is possible to change users' habits,**

improve comfort and air quality conditions, and reduce the usage of public resources by applying this methodology and with a very low investment.

Index Terms— Methodology; energy efficiency; comfort; public building; low cost.

I. INTRODUCCIÓN

La mejora de la eficiencia energética en los edificios es un compromiso adquirido por la UE por razones medioambientales, económicas y geopolíticas. Según el último informe anual de 2017 sobre la eficiencia energética en la Unión Europea (Ministerio, 2017), la intensidad energética final ha disminuido en un 21,7% entre 2000 y 2015. Estos valores tienen en cuenta los sectores de la industria, el transporte, la agricultura, y residenciales, pero hay grandes diferencias entre ellos. En los dos primeros, el consumo de energía ha disminuido considerablemente, en el residencial se ha mantenido sin cambios desde 2011, pero en el sector servicios ha aumentado desde 2014 (Eurostat, 2017).

Dentro del sector servicios existe un gran parque de edificios públicos, en muchos casos obsoleto e ineficiente. En ellos, las intervenciones de rehabilitación deben realizarse considerando el análisis individual de cada edificio, sin embargo, el análisis colectivo podría ayudar a la priorización de las inversiones en razón del uso del edificio, y coste ambiental y/o económico de las mismas (Patiño-Cambeiro et al., 2019). Por otro lado, para realizar un diagnóstico adecuado se necesita disponer de los datos de funcionamiento, estos pueden proceder de facturas energéticas (Geng et al., 2018) o bien de valores en tiempo real (Aste et al., 2018; Batista et al., 2014; Sharmin et al., 2014). La ventaja que proporcionan estos últimos es la posibilidad de tomar decisiones rápidas, y de desglosar en tiempos de lectura más pequeños (horas, días), y según zonas, lo que facilita un análisis mucho más pormenorizado y ajustado (Langevin et al., 2015; Vellei et al., 2016; European Commission, 2008); para lograr una amplia implantación de estos sistemas la tecnología utilizada debe ser de bajo coste (Bamodu et al., 2017; Ciuffoletti, 2018). Por otro lado, esta tecnología, que permite a los usuarios la vigilancia de las variables, facilita su participación. El usuario es una de las piezas claves para liderar el cambio (Tam et al., 2018a; Al horr et al., 2016), está demostrado que los hábitos influyen determinantemente en el comportamiento del edificio (Tam et al., 2018b; Zhang et al., 2018; Ahn and Park, 2016). Asimismo existen dos parámetros fundamentales que deben añadirse al análisis energético: la calidad del aire interior y el confort (Allab et al., 2017; Zhang and Zhao, 2009).

Por tanto, el objetivo de esta investigación es plantear una metodología, que ayude en la mejora energética, y específicamente en la calidad del aire y del confort de edificios públicos estudiados de forma conjunta, utilizando tecnología de datos de bajo coste, y liderada por los usuarios.

II. DESARROLLO Y METODOLOGÍA

El presente trabajo se lleva a cabo en 4 edificios públicos utilizados como Ayuntamientos situados en Arroyo de la Luz, Casar de Cáceres, Malpartida de Cáceres y Sierra de Fuentes. Todos ellos son de construcción tradicional, con dos plantas, y de tamaño y características constructivas similares (Figura 1). En ellos se puso en marcha un proyecto, de duración de un año, con el objetivo general de mejorar la eficiencia en el funcionamiento y el consumo de esta tipología en la provincia de Cáceres. Entre los objetivos secundarios estaban además los de sensibilizar a los usuarios y trabajadores de estos edificios en el aprovechamiento de los recursos públicos, y mejorar de la situación de bienestar térmico en los mismos (mediante la visualización de datos).

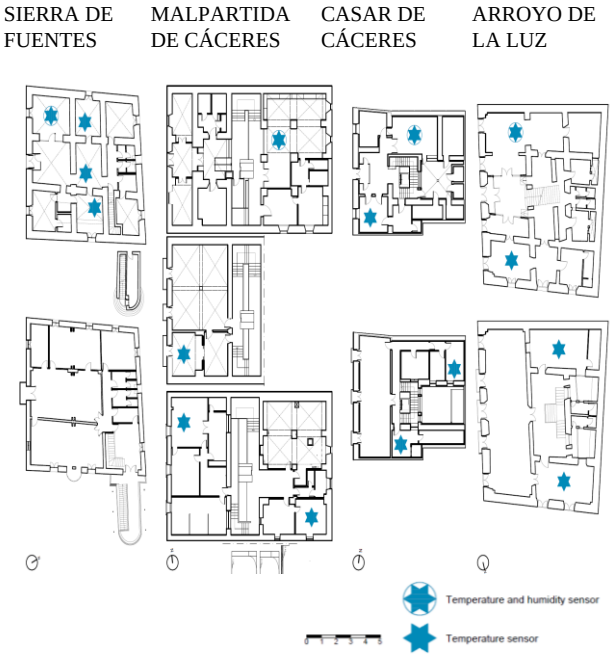


Fig. 1. Levantamiento de los cuatro edificios analizados y disposición de los sensores

Se ha diseñado una metodología que se desarrolla en tres etapas (Figura 2). En primer lugar, se han elegido los dispositivos, de bajo coste, escalables y de fuentes abiertas (que permitan una fácil ampliación y conexión posterior al sistema de información). Estos pueden publicar los datos directamente usando el servicio recolector (envían directamente la información y se configuran con una dirección IP que codifica del servicio recolector del bus de servicios), o bien pueden ser consultados mediante un script. En este caso se han elegido sensores inalámbricos, y alimentados por baterías, de las variables que pueden influir en su comportamiento energético

(humedad, temperatura, CO_2, y consumo eléctrico); además en los edificios públicos podría interesar sensorizar la seguridad (sensores de presencia, de rotura de cristales, de vibración, humos, inundación, gas), la climatización (temperatura, humedad, presión, flujo), o el clima (radiación solar, viento, lluvia, o presión atmosférica). Estos sensores han sido situados en lugares estratégicos y representativos de cada planta, orientación, zona…, requiriendo previamente un estudio de las conexiones a red y/o el mantenimiento necesario.

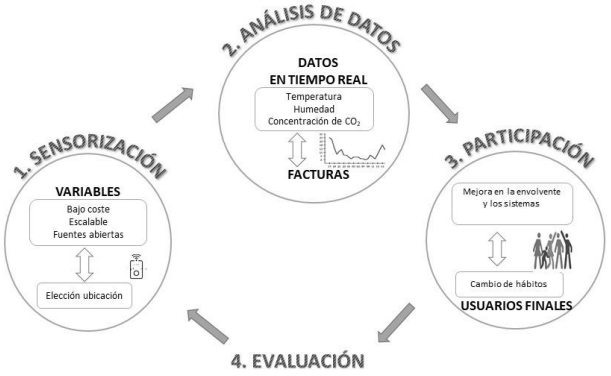


Fig. 2. Esquema de la metodología utilizada en el Proyecto.

El segundo paso consiste en el análisis de los datos almacenados: estudio de períodos horarios, diarios y estacionales, según estancias, y rangos según normativa. Este trabajo permite realizar un diagnóstico acertado y de diseño de estrategias prioritarias para la modificación del comportamiento en los espacios del edificio en tiempo real. En este caso se ha estudiado la calidad del aire interior, y con ello las infiltraciones de la envolvente; y el confort higrotérmico. Además, los resultados se compararon con la serie temporal de los últimos tres años de facturas de consumo, así como con datos de consumo eléctrico en tiempo real, todo ello para asegurar la validez de los resultados obtenidos y estrategias propuestas.

Para finalizar, por un lado, se han aportado los resultados y propuestas a los propietarios y usuarios de los edificios, y además se han realizado acciones de sensibilización hacia el uso del patrimonio público, a través de propuestas de cambio de hábitos. Para garantizar el funcionamiento del sistema esta metodología debe alimentarse de forma circular con una evaluación de los cambios que se puedan ir generando.

III. Resultados y discusión

A. Disposición de los equipos de medida

Se ha utilizado el sistema de información implantado en el proyecto Smartpolitech en la Escuela Politécnica de Cáceres (Extremadura University, 2019). Lo sensores instalados han sido de la marca RAY (Ray, 2015) STH (temperatura y humedad) y STC (además medición de CO_2), con comunicación WIFI, pilas LR14 de duración de un año con lecturas cada 30 minutos, precisión +/- 3% ppm, +/- 0.5 ºC°, y +/- 3% RH. La temporalización de la adquisición de datos ha dependido de la facilidad de instalación en cada uno de los ayuntamientos, desde el 27 de marzo de 2017 al 26 de enero de 2018. La situación de los sensores ha sido elegida de forma que representaran la planta baja y alta de los edificios, así como su perfil de

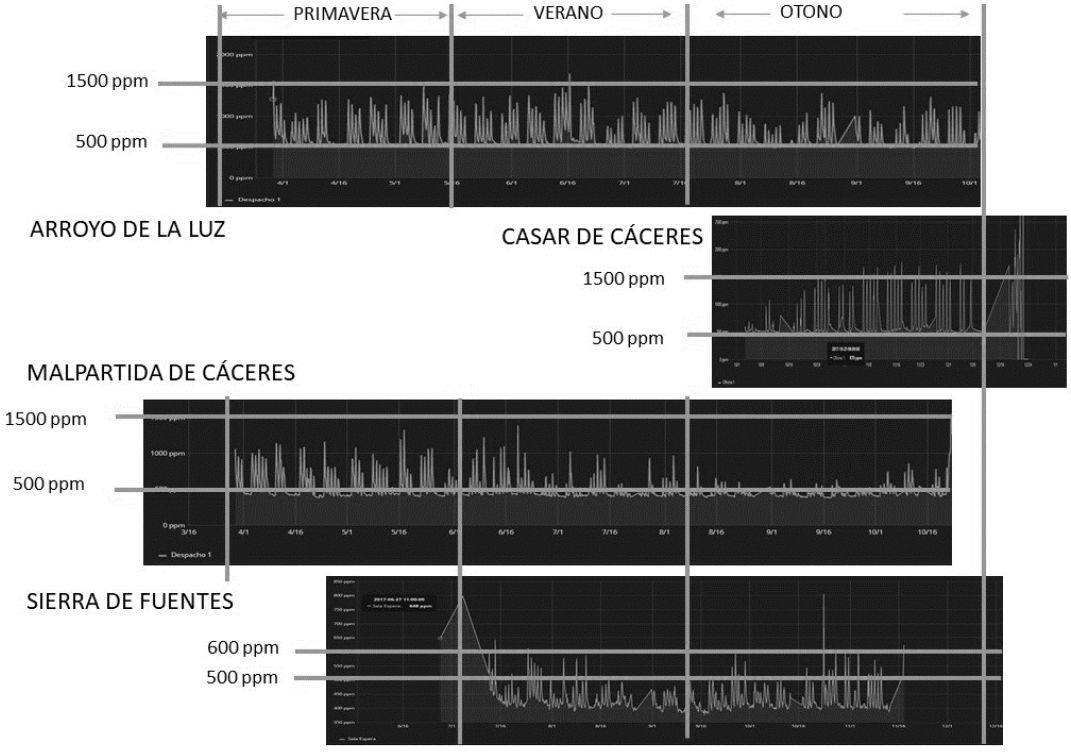


Fig. 3. Comportamiento de la concentración de CO2 captado por los sensores a lo largo del proyecto y relación con las disposiciones normativas españolas.

ocupación (oficinas y despachos, sala de atención al público, almacenes y archivos) y orientación geográfica (Figura 1).

B. Análisis de datos

1) Calidad del aire.

Los sensores de medición de la concentración de CO_2 se instalaron en las salas de atención al público, que son las de mayor ocupación tanto de personal como de visitantes (Figura 1). Según la normativa (Ministry, 2007) 800 ppm es un valor de concentración aceptable, y 1500 ppm es el valor máximo permitido. El comportamiento de la concentración de CO_2 se repite semanalmente con un patrón similar en todos los edificios: en los días laborales parte de una base nocturna de unos 500 ppm y a partir de las 8 h se va incrementando hasta alcanzar un pico entre las 14 y 14:30 h de hasta 1750 ppm (en los casos más altos). Este valor disminuye rápidamente entre cinco y siete horas después, hasta volver a alcanzar de nuevo el nivel base, sin realizar ninguna acción para provocar la ventilación del aire. Por lo cual esta evolución está claramente asociada a la ocupación diaria, el fin de semana aparece estable con valores mínimos. Este comportamiento responde a una alta infiltración a través de la envolvente de los espacios. En los meses cálidos la concentración baja sensiblemente en algunas salas por la probable apertura de las ventanas (Malpartida que pasa de unos 1000 ppm a 600 ppm, o Arroyo de 1400 a 1000 ppm) (Figura 3).

Asimismo, se ha realizado un análisis semanal pormenorizado; dado que no hay períodos similares sensorizados en los cuatro edificios, se ha elegido una semana que pudieran equiparse térmicamente (última semana de octubre y a mediados de abril) (Figura 4).

Estas salas tienen una ocupación de entre 2 y 5 trabajadores, en unas superficies de entre 24 y 81 m^2, de modo que la densidad de ocupación (superficie útil por número de personas) varía entre 10.0 y 16.2 m^2/p. Hay otro tipo de usuarios que son los visitantes, en este caso la población de los municipios varía entre 1800 y 5800, si se supusiera un uso simultáneo, supondría una densidad de ocupación: entre 0,007 y 0,018 m^2/p. Asimismo, para valorar las infiltraciones, se han comparado los tamaños de los huecos de las salas, los huecos exteriores fluctúan entre 1 y 6 m^2 (en esta semana permanecen cerrados) y los interiores entre 3 y 20 m^2 (habría que valorar el tiempo que permanecen abiertos, en las fotos se observa que este hecho varía en cada situación). Con todo ello se concluye en los resultados punta de concentración de CO_2 que el edificio con mayor superficie de huecos, Malpartida, tiene una mayor calidad del aire, 1100 ppm, también corresponde a la densidad mayor de ocupación tanto fija como de visitantes; y sin embargo la sala con menor superficie de huecos, Casar de Cáceres, y la menor densidad de ocupación, llega a valores mucho más altos, 1750 ppm (Figura 5).

2) Análisis higrotérmico

Las temperaturas exteriores fluctúan en el período sensorizado del siguiente modo: en primavera entre 5ºC y 32ºC, 25% y 100% de humedad; en verano entre 15ºC y 38ºC, 20 y 80 % de humedad; y en otoño entre 30ºC y 0ºC, y 40% y 100% de humedad (Figura 6). Este año se reconoce como muy cálido (Agencia, 2018).

Se han tenido en cuenta los valores de temperatura operativa de confort, para el cual el PPD (porcentaje de personas insatisfechas) está por debajo del 10%. Estos son de entre 20ºC y 24ºC en invierno, y entre 23ºC y 26ºC en verano, con una humedad relativa entre 30% y 70% en ambas estaciones (Ministry, 2007). Además, se han establecidos valores de confort para períodos intermedios de otoño y primavera entre 20º y 26ºC.

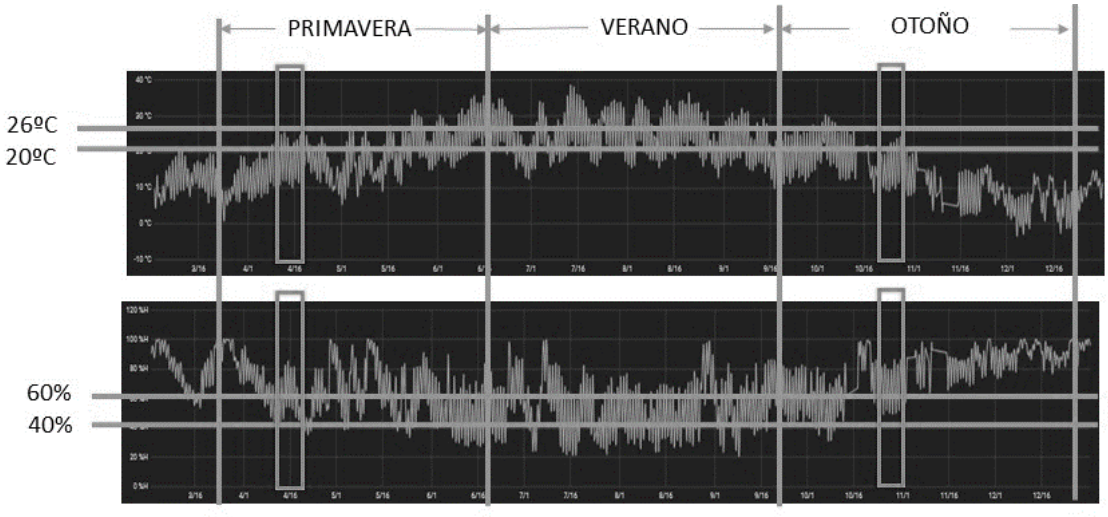
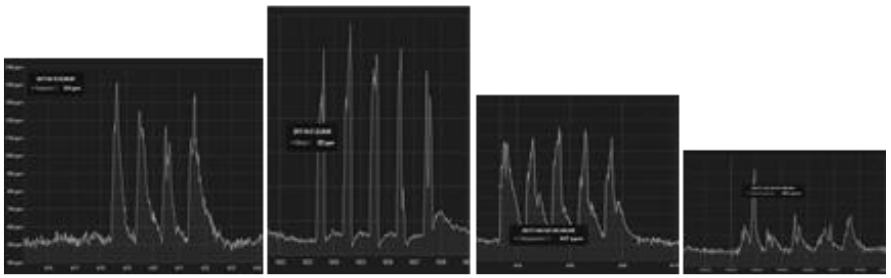


Fig. 4. Gráficas de datos temporales de la temperatura y humedad exterior en el período sensorizado, especificación de las semanas en las que se ha analizado CO_2 y relación con bienestar (RITE).



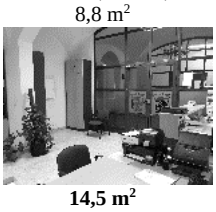
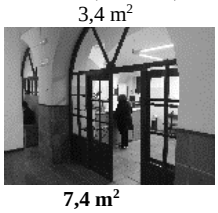
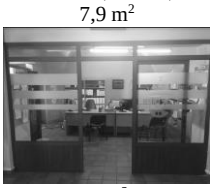
	ARROYO DE LA L.	CASAR DE C.	MALPARTIDADEC.	SIERRA DE F.
Nº trabajadores	5	9	5	2
Superficie útil	67 m^2	30 m^2	81 m^2	24 m^2
Den. ocup. fija	**13,4 m^2/p**	**10,0 m^2/p**	**16,2 m^2/p**	**12,0 m^2/p**
Población (2017)	5917	4532	4381	1813
Den. ocup. vis.	**0.011 m^2/p**	**0.007 m^2/p**	**0.018 m^2/p**	**0.013 m^2/p**
Huecos ext.	5,7 m^2 (madera)	4,3 m^2 (aluminio)	3 m^2 (madera)	1,1 m^2 (madera)
Huecos int.	8,8 m^2	3,4 m^2	20,0 m^2	7,9 m^2
				
Total huecos	**14,5 m^2**	**7,4 m^2**	**23,0 m^2**	**9,0 m^2**
PICO CO_2	**1400 ppm**	**1750 ppm**	**1100 ppm**	**900-600 ppm**

Fig. 5. Análisis de patrón semanal del comportamiento de la concentración de CO_2 con ventanas cerradas captado por los sensores en Arroyo de la Luz, Casar de Cáceres, Malpartida de Cáceres y Sierra de Fuentes.

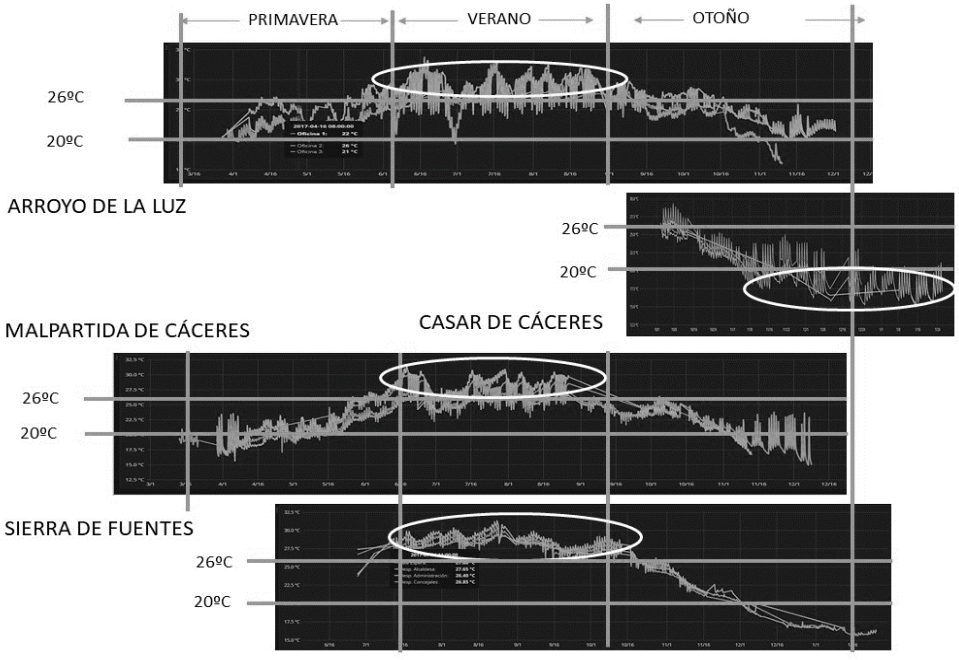


Fig. 6. Comportamiento térmico captado por los sensores a lo largo del proyecto y relación con las normativas.

Los resultados, respecto al confort higrotérmico en los edificios, son bastante similares en los distintos períodos estacionales. En los períodos centrales de la primavera y el otoño, en los cuales no es habitual el uso de los sistemas de climatización, la temperatura y humedad relativa interior está dentro de los rangos de confort. No sucede lo mismo en los tramos extremos de estas dos estaciones en los que se alcanzan desde los 15ºC hasta los 28ºC. En estos casos la temperatura de

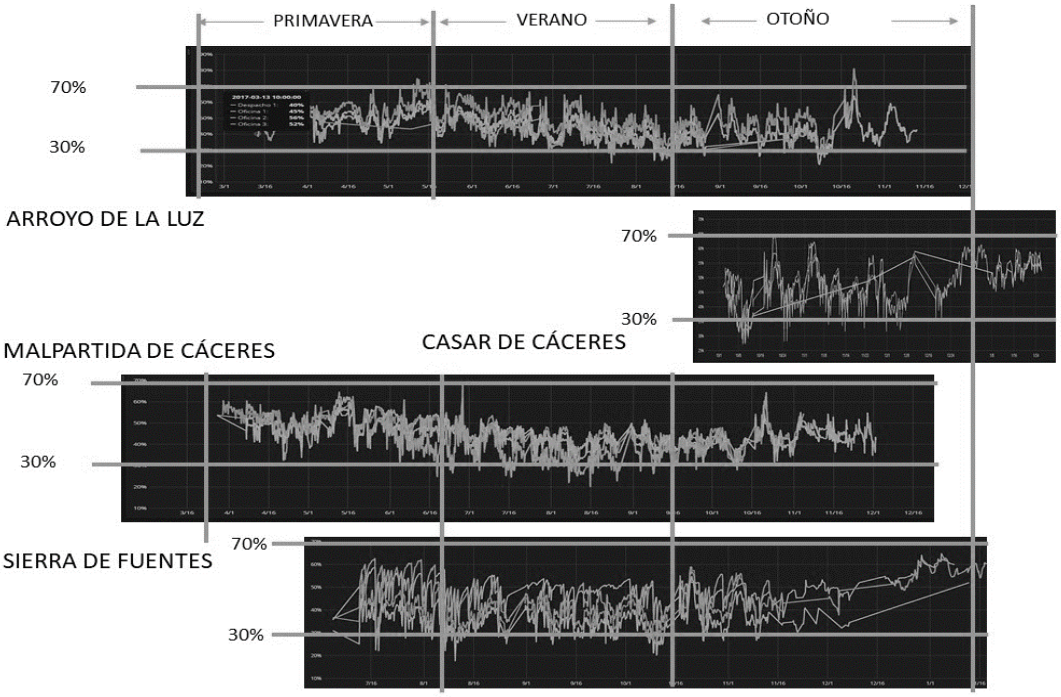


Fig. 7. Comportamiento de la humedad relativa interior captado por los sensores a lo largo del Proyecto.

la planta alta siempre es superior entre 2 y 5ºC a la de la planta alta. En verano los valores están, en general, dentro del rango de confort en la planta baja y fuera del rango de confort en el piso superior. con hasta los 32ºC; los sistemas de acondicionamiento, que reducen temporalmente las temperaturas, solo están disponibles en esta planta. Respecto al período invernal no se han conseguido datos completos, los existentes demuestran gran disconfort con los sistemas de calefacción desconectados (los sistemas son equipos puntuales individuales eléctricos, y en Casar y Malpartida caldera de gasoil) (Figura 7). Respecto a la humedad relativa la situación general está dentro del confort (Figura 8).

3) Monitorización y participación

Para garantizar la difusión y la continuidad del proyecto se realizó una jornada informativa y de sensibilización con la presencia de todos los técnicos y gestores de los cuatro ayuntamientos, así como del Diputado de Infraestructuras de la Diputación Provincial de Cáceres, responsable del proyecto (Figura 8) y se les entregaron las claves para poder realizar el seguimiento en tiempo real de los datos. Además, se presentó la web del proyecto (http://comphas.unex.es/sensorizacionayuntamientos).

Fig. 8. Jornada de difusión entre los administradores y técnicos de los edificios.

En esta jornada se les informó de las posibles estrategias para mejorar la calidad del aire y el confort, compartiendo el comportamiento similar entre los edificios, y limitándose en este caso a cambios de hábitos. De esta manera, la ventilación de los espacios debe adecuarse a los datos en tiempo real del aire interior y así evitar la alta concentración de partículas de CO_2 que aparecen a última hora de la mañana. Las caídas bruscas indican que deben cuidarse los movimientos de aire no deseados, sobre todo cuando está conectado el sistema de climatización. Los resultados indican que el diferente comportamiento de los usuarios en la apertura de ventanas, o puertas puede influir de forma determinante, y que tanto las infiltraciones como la densidad de ocupación son muy relevantes. Por otro lado, se les comunica que se observa una gran estabilidad de las temperaturas, los valores térmicos interiores se alejan de los valores exteriores sin el uso de sistemas, debido probablemente a esta tipología de edificio con muros de inercia y suelo en contacto con el terreno, que provoca situaciones de confort en una gran parte del año. Este hecho debe seguir aprovechándose, se recomienda que el uso de sistemas de acondicionamiento y ventilación se ajusten de acuerdo con los datos de temperatura y humedad y las condiciones de confort. Para la continuidad del proyecto, se recomienda a los gerentes públicos que monitoricen la información para su visualización en los ordenadores personales existentes y facilitar la toma de decisiones.

IV. CONCLUSIONES

En este proyecto se ha demostrado que los edificios podrían mejorar su calidad del aire y el confort de los usuarios mediante la monitorización de datos en tiempo real. Así mismo la puesta

a disposición de los técnicos municipales de una herramienta adecuada ayudaría en la gestión de recursos públicos.

Este proyecto de muy bajo presupuesto ha sido posible utilizando sensores de bajo coste y un sistema de información ya existente, que podría ser implementado por la Administración para sus edificios.

AGRADECIMIENTOS

Este artículo ha sido posible gracias a la ayuda GR18032 de la Consejería de Economía e Infraestructuras de la Junta de Extremadura y del Fondo Europeo de Desarrollo Regional de la UE. El proyecto fue concedido en la convocatoria del Plan de iniciación a la investigación, desarrollo tecnológico e innovación de la UEx, 2016, Subprograma Diputación Provincial de Cáceres, línea de desarrollo local, TIC en áreas rurales, "smart villages" (FEDER y Junta de Extremadura), fue desarrollado por los grupos "COMPHAS" y "ROBOLAB" gracias a la ayuda GR15107. Se agradece a la Diputación y ayuntamientos el permiso para la difusión de los datos obtenidos, y al trabajo realizado por L. Colchón, A. Arévalo y A. Núñez, estudiantes del Grado en Edificación de la Escuela Politécnica de Cáceres.

REFERENCIAS

Agencia Estatal de Meteorología (2018). "Resumen climático". [Online]. Available: http://www.aemet.es/es/noticias/2018/01/Resumen_climatico_2017. [Accessed: 31-Jan-2020].

Ahn, K.-U. and Park, C.-S. (2016). "Correlation between occupants and energy consumption," Energy Build., vol. 116, pp. 420–433, Mar. 2016.

Al horr, Y.; Arif, M.; Katafygiotou, M.; Mazroei, A.; Kaushik, A. and Elsarrag, E. (2016). "Impact of indoor environmental quality on occupant well-being and comfort: A review of the literature," International Journal of Sustainable Built Environment, vol. 5, no. 1.

Allab, Y.; Pellegrino, M.; Guo, X.; Nefzaoui, E. and Kindinis, A. (2017). "Energy and comfort assessment in educational building: Case study in a French university campus," Energy Build., vol. 143, pp. 202–219, May 2017.

Aste, N.; Buzzetti, M.; Caputo, P. and Del Pero, C. (2018). "Regional policies toward energy efficiency and renewable energy sources integration: Results of a wide monitoring campaign," Sustain. Cities Soc., vol. 36, pp. 215–224.

Bamodu, O.; Xia, L. and Tang, L. (2017). "An indoor environment monitoring system using low-cost sensor network," Energy Procedia, vol. 141, pp. 660–666, Dec. 2017.

Batista, A. P.; Freitas, M. E. A. and Jota, F. G. (2014). "Evaluation and improvement of the energy performance of a building's equipment and subsystems through continuous monitoring," Energy Build., vol. 75, pp. 368–381.

Ciuffoletti, A. (2018). "Low-Cost IoT: A Holistic Approach," J. Sens. Actuator Networks, vol. 7, no. 2, p. 19, May 2018.

European Commission (2008). "Monitoring and control of energy consumption in municipal public buildings over the Internet (ENERINTOWN Project)". [Online]. Available: https://ec.europa.eu/energy/intelligent/projects/en/projects/enerintown. [Accessed: 12-Jan-2020].

Eurostat and European Commission (2017). "Final Energy Consumption," Eurostat. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy_statistics_-_an_overview. [Accessed: 10-Jan-2020].

Extremadura University (2019). "SmartPolitech Project. School of Technology," 2016. [Online]. Available: http://smartpolitech.unex.es/. [Accessed: 15-Sep-2019].

Geng, Y.; Ji, W.; Lin, B.; Hong, J. and Zhu, Y. (2018). "Building energy performance diagnosis using energy bills and weather data," Energy Build., vol. 172, pp. 181–191.

Langevin, J.; Gurian, P. L. and Wen, J. (2015). "Tracking the human-building interaction: A longitudinal field study of occupant behavior in air-conditioned offices," J. Environ. Psychol., vol. 42, pp. 94–115.

Ministerio de Energía Turismo y Agenda Digital (2017). "Plan Nacional de acción de eficiencia energética 2017-2020".

Ministry of Industry Energy and Tourism (2007). Spanish Government., Regulation of Thermal Installations in Buildings. Boletín Oficial del Estado, pp. 35931–35984.

Patiño-Cambeiro, F.; Armesto, J.; Bastos, G.; Prieto-López, J. I. and Patiño-Barbeito, F. (2019). "Economic appraisal of energy efficiency renovations in tertiary buildings," Sustain. Cities Soc., vol. 47, p. 101503.

Ray Ingenieria Electronica (2015). "Wireless STHR sensors". [Online]. Available: http://www.ray-ie.com/. [Accessed: 02-Jan-2020].

Sharmin, T.; Gül, M.; Li, X.; Ganev, V.; Nikolaidis, I. and Al-Hussein, M. (2014). "Monitoring building energy consumption, thermal performance, and indoor air quality in a cold climate region," Sustain. Cities Soc., vol. 13, pp. 57–68.

Tam, V.; Almeida, L. and Khoa, L. (2018a). "Energy-related occupant behaviour and its implications in energy use: A chronological review," Sustainability, vol. 10, no. 8, p. 2635, 2018.

Tam, V.; Almeida, L. and Le, K. (2018b). "Energy-Related Occupant Behaviour and Its Implications in Energy Use: A Chronological Review," Sustainability, vol. 10, no. 8, p. 2635, Jul. 2018.

Vellei, M.; Natarajan, S.; Biri, B.; Padget, J. and Walker, I. (2016). "The effect of real-time context-aware feedback on occupants' heating behaviour and thermal adaptation," Energy Build., vol. 123, pp. 179–191, Jul. 2016.

Zhang, Y.; Bai, X.; Mills, F. P. and Pezzey, J. C. V. (2018). "Rethinking the role of occupant behavior in building

energy performance: A review," Energy Build., vol. 172, pp. 279–294, Aug. 2018.

Zhang, Y. and Zhao, R. (2009). "Relationship between thermal sensation and comfort in non-uniform and dynamic environments," Build. Environ., vol. 44, no. 7, pp. 1386–1391, Jul. 2009.

Reconocimiento – NoComercial (by-nc): Se permite la generación de obras derivadas siempre que no se haga un uso comercial. Tampoco se puede utilizar la obra original con finalidades comerciales.