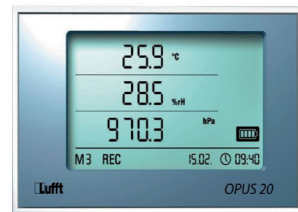


Sistema de monitorización de temperatura y humedad en la edificación. Aplicación a una vivienda de Madrid



Temperature and relative humidity monitoring system in buildings. A study case of a flat in madrid



Luisa García-Fuentevilla, Alejandro Payán-de-Tejada-Alonso, Carlos Morón-Fernández

Universidad Politécnica de Madrid. E.T.S. Edificación. Dpto. Tecnología de la Edificación. Avda Juan Herrera, 6 - 28040 Madrid

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8203> | Recibido: 04/11/2016 • Evaluado: 07/11/2016 • Aceptado: 17/01/2017

ABSTRACT

- Presently, one of the most important objectives of building sector is to provide housing users comfort. So, to monitor comfort parameters plays an important and essential role. However, monitoring process can be laborious and too much expensive. Because of this, in this work an easy and cheap temperature and relative humidity monitoring system has been developed. It is based on Arduino platform. This system has been used in an inner house in Madrid, and the data obtained from it has been compared to data from a commercial thermohygrometer, which is more expensive than the based-on-Arduino system. This way, this system reliability has been checked. Furthermore, both temperature and relative humidity data are within the normative comfort values.
- **Keywords:** Thermal comfort; Arduino; Temperature; Humidity; Monitoring.

RESUMEN

Uno de los principales objetivos actuales del sector residencial es proveer de confort al usuario de las distintas viviendas. Por ello, la monitorización de los parámetros de confort de una vivienda juega un papel importante e imprescindible. Sin embargo, el proceso de monitorización puede ser laborioso y suponer un alto coste. Por ese motivo, en este trabajo se ha desarrollado un sistema de monitorización sencillo y de bajo coste basado en la plataforma Arduino para medir los valores de humedad relativa y temperatura. Dicho sistema se ha utilizado en una vivienda céntrica de Madrid, y los datos obtenidos se han comparado con los obtenidos mediante un termohigrómetro comercial, económicamente más costoso. De esta forma se ha comprobado la fiabilidad de nuestro sistema, además de mostrar éste unos valores tanto de temperatura como de humedad que están dentro de los valores de confort reflejados en la normativa actual.

Palabras clave: Bienestar térmico; Arduino; Temperatura; Humedad; Monitorización.

la temperatura y la humedad relativa como dos variables influyentes. Además, se ha demostrado que tanto la temperatura como la humedad relativa ambiental juegan un papel importante en muchos de los aspectos de la edificación actual. Prueba de ello es la preocupación actual por la reducción del consumo energético de los edificios y el intento de optimización de sistemas de climatización, ya sean de refrigeración o calefacción [2-6]. Para que estos sistemas funcionen correctamente, o con el fin de comprobar su eficacia, es necesario realizar una monitorización en tiempo real de temperatura y humedad relativa haciendo que estos procesos en el edificio sean lo más eficientes posible.

Dada la importancia de la temperatura y humedad en la edificación actual, en este trabajo se ha desarrollado un sistema de monitorización de bajo coste de estas magnitudes. El coste de este sistema de monitorización es una variable influyente en la decisión de su incorporación al sector residencial. Actualmente, las soluciones comerciales disponibles de monitorización termohigrométrica necesitan de inversiones importantes para su utilización desde el punto de vista del usuario particular. Con sistemas de bajo coste se pretende facilitar la integración de estos sistemas, lo que conlleva una optimización de los recursos energéticos al poseer el usuario información continua sobre su vivienda y poder tomar mejores decisiones energéticas.

El presente trabajo los hemos estructurado en diferentes secciones. La primera de ellas, "Temperatura y humedad", analiza la importancia de dichos parámetros en la edificación. La sección siguiente, "Dispositivo experimental", describe las características del sistema de monitorización de temperatura y humedad de bajo coste desarrollado para este trabajo, así como las características de un sistema de monitorización tradicional de temperatura y humedad. Ambos procesos de monitorización y el lugar y espacio de tiempo común elegido para llevar a cabo dichas monitorizaciones son también descritos en esta sección. En la sección "Resultados y discusión" se comparan y discuten los resultados de temperatura y humedad obtenidos con ambos sistemas de monitorización, apoyando esta discusión con datos numéricos. Finalmente, en la sección "Conclusiones" se destaca la fiabilidad del sistema de bajo coste desarrollado en este trabajo.

1. INTRODUCCIÓN

El bienestar térmico es, tal y como cita la norma UNE-EN ISO 7730:2006 [1], "aquella condición en la que existe satisfacción respecto del ambiente térmico". En esta misma norma se marcan

2. TEMPERATURA Y HUMEDAD

El confort en el ámbito de la edificación consta de un conjunto de factores que afectan a la calidad del ambiente térmico, acústico, luminoso y la calidad del aire. Sin embargo, la sensación de

bienestar no solo depende de la calidad del ambiente descrito sino, también, de los hábitos, estrés, condición social, nivel cultural e, incluso, de criterios subjetivos debidos a diferencias de sensibilidad entre los individuos [7].

El confort está íntimamente relacionado con el bienestar físico y la comodidad de las personas con las condiciones ambientales como la temperatura, la humedad y el movimiento del aire. Algunos estudios [8-9] establecen un nivel de confort óptimo para las personas cuando la temperatura oscila entre 21 °C y 26 °C, y la humedad relativa está entre el 30 % y el 70 %. Naturalmente estos valores dependen de algunos factores, y en concreto esos datos son válidos para personas vestidas con ropa ligera, a la sombra y relativamente inactivas. Así, para que la temperatura corporal esté alrededor de 37 °C y asegurar el confort térmico, el cuerpo humano debe liberar el exceso de calor mediante radiación, convección, conducción y evaporación, logrando así una temperatura constante en el cuerpo. Se han hecho investigaciones recientes por la *American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers* (ASHRAE) [10] que indican que los usuarios de edificaciones ventiladas naturalmente se sienten confortables en un mayor rango de condiciones de temperatura y humedad, que la gente habituada al aire acondicionado.

No obstante, aunque las condiciones de temperatura y humedad óptimas para cada persona son aproximadamente constantes, varían de una persona a otra. En España, normalmente, a la hora de confeccionar un proyecto de obra, se suelen adoptar unas condiciones interiores de 25 °C y humedad relativa alrededor de un 50 %. Estas condiciones de confort expuestas, corresponden exclusivamente a verano. Es un hecho comprobado, que las condiciones óptimas de confort son distintas en invierno. Así encontramos que, en invierno, temperaturas superiores a 21 °C o 22 °C suelen ser molestas para la mayoría de los ocupantes. Nuevamente, la humedad que suele ser correcta, se encuentra alrededor del 50 %. En resumen, las condiciones óptimas en invierno normalmente aceptadas son las de 20 °C en temperatura y 50 % de humedad relativa [11], con unas tolerancias de ± 1 °C a 1,5 °C en la temperatura y de $\pm 10\%$ a 15% sobre la humedad relativa [12].

Algunos trabajos como el de Parthasarathy et al. [13] demuestran que la monitorización de temperatura y humedad es también enormemente útil para otros ámbitos como observar la influencia de las emisiones de formaldehído, provenientes de algunos de los materiales utilizados en la construcción de unidades de alojamiento temporal, comprobando que un incremento en la temperatura o en la humedad incrementaban las emisiones.

Otros usos más técnicos para sistemas de monitorización de temperatura y humedad se exponen en el trabajo de Yong Xia et al [14]. En él se lleva a cabo la monitorización sobre una estructura de hormigón para analizar la causa de que el módulo de elasticidad del hormigón se vea deteriorado por un incremento de la temperatura. También demuestran que en el caso la humedad se repite esta relación, un contenido alto de humedad deteriora el módulo de elasticidad por reducciones en las frecuencias naturales.

3. DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

Para la monitorización tradicional se ha utilizado un termohigrómetro comercial modelo OPUS 20 y para la monitorización de bajo coste se ha utilizado un dispositivo basado en Arduino. Arduino es un proyecto del Instituto de Diseño Interactivo de Ivrea en Italia. Se basa en la filosofía DIY (*Do It Yourself*, "Hazlo tú mismo"). Además, tiene como ventaja su código abierto donde tanto el software como el hardware son libres [15].

El lugar elegido para llevar a cabo ambas monitorizaciones ha sido una habitación con función de dormitorio de una vivienda en el distrito centro de Madrid, exterior, con una superficie de 12 m2. Existe una conexión al exterior a través de un balcón cuyas puertas tienen doble acristalamiento con rotura de puente térmico.

Los sistemas de monitorización empleados han sido los siguientes: como sistema de monitorización de bajo coste, el sensor AM2302 de la casa Aosong conectado a la placa Arduino UNO; y como sistema de monitorización tradicional el termohigrómetro OPUS 20 CTO, de la casa Lufft. Las características de ambos sensores están especificadas en la Tabla 1.

El funcionamiento de nuestro sistema de monitorización se ha basado en la plataforma Arduino. Para llevar a cabo la monitorización, se ha utilizado una protoboard para facilitar las conexiones entre el sensor y una placa Arduino Uno (rev3) de la casa Arduino. El dispositivo experimental es el mostrado en la Figura 1. Para proporcionar alimentación a la placa y ésta a su vez al sensor de temperatura y humedad AM2302, se ha conectado ésta a un PC mediante un cable USB. Para programar el funcionamiento de la placa ha sido necesaria la instalación del software Arduino, y para visualizar los datos en tiempo real y almacenarlos se ha utilizado el software CoolTerm [16].

El termohigrómetro OPUS 20 funciona de manera autónoma con un sistema de alimentación en corriente continua. Para obtener los datos registrados por este termohigrómetro, ha sido necesaria su conexión al ordenador mediante un cable USB. Mediante el software SmartGraph3, proporcionado por la casa Lufft, se han almacenado los datos en un formato de archivo apropiado para poder trabajar con ellos.

Parámetro		OPUS 20 CTO	AM2302
Temperatura	Rango de medida	-20°C - 50°C	-40°C - 80°C
	Precisión	$\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ (0°C-40°C); $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ (Resto del rango)	0.5°C
	Resolución	0.1°C	0.1°C
Humedad	Rango de medida	0 - 100% HR	0 - 100% HR
	Precisión	$\pm 2\%$	$\pm 2\%$ - 5%
	Resolución	0.1%	0.1%
Consumo		0.02 W	0.01 W

Tabla 1: Comparación de las características de los sensores utilizados

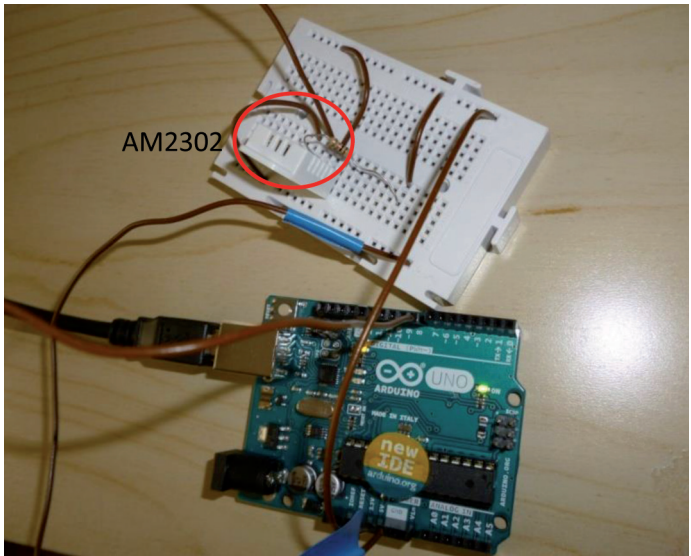


Fig. 1: Dispositivo de monitorización de bajo coste

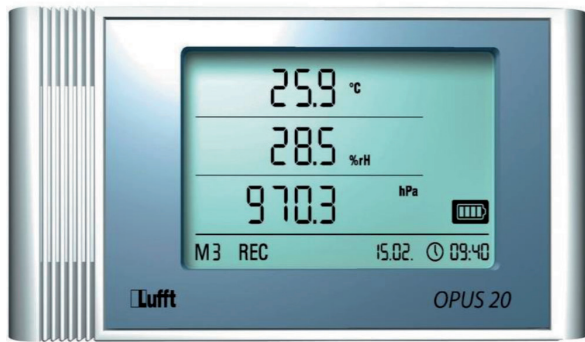


Fig. 2: Sistemas de monitorización tradicional con el termohigrómetro OPUS20

Se han llevado a cabo monitorizaciones durante un mes de ensayo para confirmar la fiabilidad de este sistema de monitorización. El tiempo de monitorización mostrado en las Figuras 3 y 4 es de 24 horas. De toda la monitorización realizada se ha elegido ese espacio de tiempo porque se ha considerado suficiente para establecer una comparación entre ambos sistemas de monitorización. Todos los periodos ofrecieron resultados similares de comparación por lo que se comenta a continuación el caso más desfavorable, como se verá más adelante.

Este caso se dio durante la monitorización que comenzó el día 4 de marzo a las 20:00 y terminó el día 5 de marzo a las 20:00. En el tiempo que ha durado la monitorización, se ha abierto el balcón en dos ocasiones. La primera, de 12:28 a 12:32. La segunda, a las 19:00 durante un minuto. Por la noche la habitación ha sido usada de dormitorio.

El sistema de monitorización tradicional se ha programado para que recogiera datos de temperatura y humedad cada 2 segundos, y muestre un valor cada 10 min, que resulte de la media de los valores recogidos durante este tiempo. Nuestro sistema de monitorización se ha programado para que recoja datos cada 14 segundos, y se han obtenido una media de grupos de valores cada 10 minutos, a fin de poder comparar de la manera más precisa posible ambos sistemas.

Ambos sistemas de monitorización han sido colocados uno junto al otro (Figura 2) y en el centro de la habitación por ser esta localización una localización válida para medir las condiciones ambientales de una estancia tal y como está recogido en las normas EN ISO 7726 [17] y ASHRAE 55 [10] aunque también queda demostrado por R. Felices [18] y J. Pfafferoth [19] que la situación de los sensores en el perímetro interior del recinto también se considera válido.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de temperatura obtenidos con ambos sistemas, durante el periodo de tiempo más desfavorable (desde las 20:00 del día 04/03/16 hasta las 20:00 del día 05/03/16), se comparan en la Figura 3.

También se muestran a continuación, en la Figura 4, los datos de humedad relativa correspondientes al periodo más desfavorable.

Tanto con el sistema de monitorización tradicional como con el de bajo coste se han detectado los cambios producidos en la temperatura y en la humedad relativa cuando se han abierto las puertas del balcón.

A fin de comparar de la manera más precisa ambos sistemas, en las Figuras 5 y 6 se puede observar los datos recogidos por ambos sistemas de temperatura y humedad relativa respectivamente durante los seis días seguidos, en concreto desde las 20 horas del

29 de abril hasta las 20 horas del 5 de marzo de 2016. Los valores representados son la media horaria calculada a partir de los valores extraídos de ambos sistemas.

Como se puede observar, el trazado en ambas Figuras (5 y 6) es muy similar. Analizando más detenidamente los pares de valores de la monitorización de la temperatura de la estancia, se ha observado que la mayor diferencia entre los valores resultantes de ambos sistemas de monitorización fue de 1,37°C. La mínima

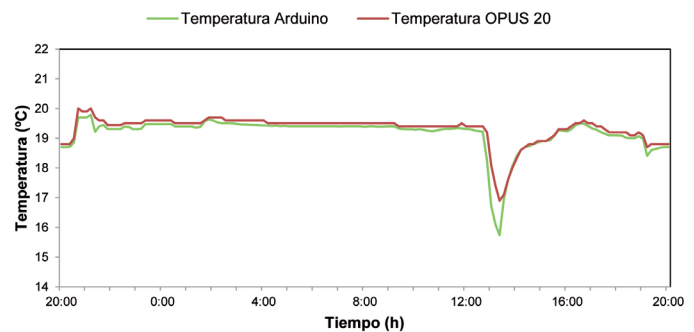


Fig. 3: Comparativa de datos de temperatura en el periodo más desfavorable (04-03-16)

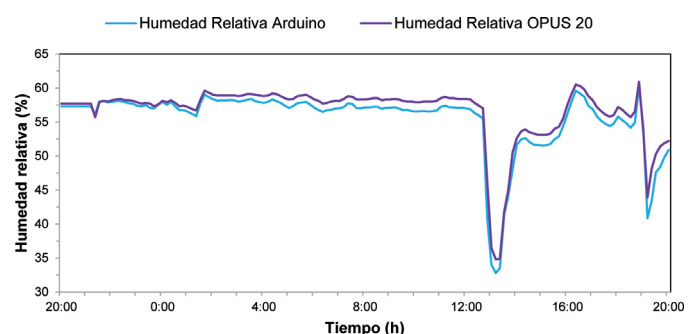


Fig. 4: Comparativa de datos de humedad relativa en el periodo más desfavorable (04-03-16)

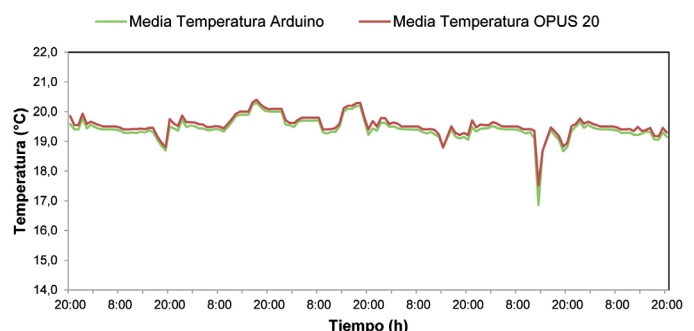


Fig. 5: Comparación de los datos de temperatura obtenidos con ambos sistemas de monitorización durante todo el periodo de monitorización

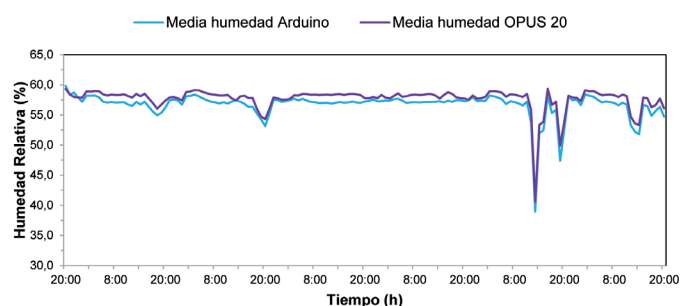


Fig. 6: Comparación de los datos de humedad relativa obtenidos con ambos sistemas de monitorización durante todo el periodo de monitorización

diferencia ha sido de 0. Como medida estadística se ha averiguado la desviación media para las diferencias entre los pares de valores, obtenida mediante la Ecuación (1), resultando ésta ser de 0,08:

$$\frac{1}{n} \sum |x - \bar{x}| \quad (1)$$

donde: n es el número de observaciones, x es la diferencia del par de valores obtenidos por ambos sistemas de monitorización para cada observación y $\bar{x}$ es la media de las diferencias observadas entre dichos pares de valores.

En cuanto a la humedad relativa del aire, la mayor diferencia entre pares de valores de ambos sistemas de monitorización ha sido de 5,36 puntos porcentuales. La mínima diferencia ha sido de 0,004 puntos porcentuales. La desviación media de la diferencia entre los pares de valores (Ecuación (1)) ha sido de 0,44.

Las diferencias observadas entre los valores de ambos sistemas de monitorización han podido ser debidas a que la precisión de los sensores utilizados no es la misma como se puede ver en la Tabla 1. Tanto en temperatura como en humedad relativa, la mayor diferencia se ha dado a las 12:30 del quinto día cuando la estancia estaba siendo ventilada, siendo el sistema de monitorización de coste bajo el que más ha acusado la bajada de los valores en temperatura y humedad relativa.

A la vista de los resultados obtenidos podemos afirmar que estamos dentro de los parámetros establecidos por la norma [12], ya que dicho Reglamento de Instalaciones Térmicas en Edificios establece que para el invierno las condiciones óptimas de calidad del aire interior se corresponden con un intervalo de temperatura de 20 °C a 24 °C y un rango de humedad de 40 % a 60 %. Además, se han seguido las directrices marcadas por la norma UNE EN ISO 7730 [1] para las zonas de bienestar situadas en el centro de una habitación, que considera una tolerancia de $\pm 1,5$ °C para la temperatura y de ± 15 % para la humedad.

En la Figura 7 se puede comprobar que la temperatura media obtenida con nuestro dispositivo es de 19.7 °C, con una tolerancia de 0.5°C, y en la Figura 8 la humedad relativa media es de 55 % con una tolerancia del 5 %, lo cual está dentro de los parámetros establecidos por la norma [1].

5. CONCLUSIONES

Se ha desarrollado un sistema de monitorización de temperatura y humedad de bajo coste que reduce un 90 % el precio con respecto a los comerciales.

Se puede observar del análisis de los resultados que, únicamente se contempla una diferencia un poco más acusada en los cambios bruscos de temperatura entre nuestro sistema y el comercial. Salvo esta circunstancia, las diferencias entre mediciones de ambos sistemas son prácticamente despreciables.

Por ello, se ha demostrado que el sistema implementado, puede ser una solución totalmente fiable para el usuario final de viviendas y utilizarse para la monitorización de temperatura y humedad relativa en éstas. Además, dicha información puede ser muy útil para la realización de estudios energéticos que integren medidas de mejora energéticas en viviendas, previsión de fallos en las instalaciones de climatización del interior de la vivienda o, sencillamente, para proveer al usuario de información real y directa de su confort térmico.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] AENOR. Norma Española UNE-EN-ISO 7730, de octubre de 2006. Ergonomía del ambiente térmico. Determinación analítica e interpretación del bienestar térmico mediante el cálculo de los índices PMV y PPD y los criterios de bienestar térmico local.
- [2] Wang Y, Kuckelkorn J, Zhao FY, Liu D, Kirschbaum A, Zhang JL. "Evaluation on classroom thermal comfort and energy performance of passive school building by optimizing HVAC control systems". Building and Environment. 2015. Vol. 89. p.86-106.
- [3] Morón C, García A, Ferrández D, Hosokawa K. "Acondicionamiento Pasivo de una Vivienda en la Sierra de Madrid = Passive Conditioning of a Building in Sierra of Madrid". Anales de edificación. 2015. Vol. 1-1. p.7-15.
- [4] de Pereda Fernández L. "Modelo de actuación para la mejora de la eficiencia energética en la Rehabilitación Integral de un palacete protegido para oficinas de la Administración en Madrid. Geotermia y estructuras termoactivas". Anales de edificación. 2015. Vol. 1-2. p.1-9.
- [5] Ávila-Delgado J, Robador MD, Barrera JA, Marrero M. "Influencia del acristalamiento sobre los parámetros y la calificación energética de acuerdo con la orientación del edificio y los porcentajes de aberturas de fachada = The influence of glazing over the parameters and energy rating according to the building orientation and the façade openings percentages". Anales de edificación. 2016. Vol. 2-1. p.34-37.
- [6] Sánchez D, Sánchez-Guevara C, Rubio C. "El enfoque adaptativo del confort térmico en Sevilla = The adaptive approach to thermal comfort in Seville". Anales de edificación. 2016. Vol. 2-1. p.38-48.
- [7] www.afec.es/es/plandecalidad/Plan_de_Calidad/parambienestar.PDF (última consulta: 6/12/2016).
- [8] A. 2012, 12. Confort y clima. Revista ARQHYS.com. Obtenido 12, 2016, de <http://www.arqhys.com/construccion/confort-clima.html>.
- [9] Solana Martínez, L.: "La percepción del confort. Análisis de los parámetros de diseño y ambientales mediante Ingeniería Kansei: Aplicación a la biblioteca de Ingeniería del Diseño (UPV)". Trabajo Fin de Grado. Universitat Politècnica de València, Junio 2011. p.1-83.
- [10] ANSI/ASHRAE Standard 55-2013, Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy.
- [11] <http://www.aireacondicionadoclima.com/2013/01/condiciones-optimas-de-confort.html> (última consulta: 6/12/2016).
- [12] RITE 1751/1998 (Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios) en ITE 02.2.1.-Bienestar térmico.
- [13] Parthasarathy S, Maddalena RL, Russell ML, Apte MG. "Effect of Temperature and Humidity on Formaldehyde Emissions in Temporary Housing Units". J. Air Et Waste Manage. Assoc. 2011. Vol. 61. p.689-695.
- [14] Xia Y, Hao H, Zanardo G, Deeks A. "Long term vibration monitoring of an RC slab: Temperature and humidity effect". Engineering Structures. 2006. Vol. 28. p.441-452.
- [15] <http://www.arduino.cc/> (última consulta: 5/3/2016).
- [16] <http://freeware.the-meiers.org> (última consulta: 5/3/2016).
- [17] Norma EN ISO 7726:2001. Ergonomics of the thermal environment - Instruments for measuring physical quantities (ISO 7726:1998).
- [18] Felices Puértolas R, Viñas Arrebola C, Losada González JC. "General methodology applied to monitoring a building to assess its energy performance". III International Congress on Construction and Building Research. Madrid, Spain, December 2015.
- [19] Pfafferoth J, Herkel S, Wambsganß M. "Design, monitoring and evaluation of a low energy office building with passive cooling by night ventilation". Energy and Buildings. 2004. Vol. 35. p.455-465.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido parcialmente subvencionado por la Universidad Politécnica de Madrid.