

## **22. Metodología para la optimización de las condiciones térmicas y de iluminación natural en la rehabilitación de habitaciones hospitalarias en el área mediterránea**

**Pérez Téllez, Juan Diego<sup>(1,\*)</sup>, Suárez Medina, Rafael<sup>(1)</sup>, León Rodríguez, Ángel Luis<sup>(1)</sup>**

(\*) Instituto Universitario de Arquitectura y Ciencias de la Construcción, Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Universidad de Sevilla, jd.pertel@gmail.com

(1) (\*) Instituto Universitario de Arquitectura y Ciencias de la Construcción, Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Universidad de Sevilla

**Resumen** El planteamiento de estrategias de mejora de eficiencia energética de los hospitales, según establece las políticas europeas del Horizonte 2020, presenta considerables retos de conocimiento y metodológicos. Se realiza una revisión de las herramientas más recientes aplicadas a la simulación de modelos energéticos validados con medidas tomadas in situ, para la caracterización energética y evaluación de distintas alternativas de rehabilitación energética. El objetivo de este trabajo es presentar un enfoque metodológico, adaptado para el caso específico de los hospitales andaluces existentes, con el objetivo de optimizar los sistemas pasivos y de envolvente térmica, frente a criterios energéticos, de confort y termo-económicos. Esta metodología se basa en la localización geográfica, las características tipológicas, constructivas y funcionales de la edificación hospitalaria; en la valoración del comportamiento energético mediante la toma de datos in situ, la monitorización, generación y calibración de modelos energéticos que permitan plantear estrategias de rehabilitación del parque hospitalario del área mediterránea.

**Palabras clave** Rehabilitación energética; Eficiencia energética; Calibración; Simulación; Monitorización.

### **1 Introducción**

El cumplimiento de los objetivos de mejora de eficiencia energética de edificios, marcados por las políticas europeas para 2020, se basará en gran medida en las decisiones tomadas por los organismos públicos, en cuanto a estrategias y planes

de rehabilitación energética del parque residencial y terciario. Frente al amplio desarrollo de investigación para la tipología residencial y de oficina, existe un notable vacío respecto a la tipología hospitalaria. Los hospitales son edificios complejos en los que se combinan una gran variedad de usos (hospitalización, administración, ambulatorio, laboratorios, técnica-sanitaria, etc.) con distintos requisitos de confort, calidad ambiental y ambientes controlados, lo cual supone una complejidad a la hora de afrontar el proceso de rehabilitación.

Para poder plantear un análisis estratégico que permita abordar este problema cabría preguntarse en primer lugar ¿Cuál es el comportamiento energético y condiciones interiores del parque de hospitales?, y en segundo lugar ¿En qué medida se pueden adaptar los hospitales existentes a los requisitos actuales dentro de una idoneidad técnica y económica? Por lo tanto, para resolver estos interrogantes, se presentan dos líneas de investigación sucesivas y complementarias: por un lado, la caracterización energética, y por otro, la evaluación energética de distintas alternativas de rehabilitación.

En el caso de los hospitales andaluces en funcionamiento, aproximadamente el 46% fueron construidos con anterioridad a la entrada en vigor de la Norma Básica de la Edificación sobre Condiciones Térmicas en los Edificios (NBE CT-79), de los cuales solamente un 23% ha sufrido algún tipo de rehabilitación integral o reforma total con posterioridad (Fig. 1). Por lo tanto, existe un gran potencial de mejora de la eficiencia energética y de las condiciones de confort, por ser edificaciones alejadas de las exigencias actuales.

Las investigaciones publicadas sobre implementación de medidas de ahorro energético en edificios existentes, siguen generalmente un enfoque metodológico dividido en tres etapas: caracterización energética, propuestas de medida de ahorro energético, y evaluación energética de las propuestas. En el ámbito de los edificios hospitalarios en el área mediterránea se han realizado algunos estudios puntuales en esta línea (Buonomano, et al., 2014) (Buonomano, et al., 2016) (Buonomano, et al., 2014). Así mismo, Zorita et al. (2016) de la Universidad de Valladolid, utilizan modelos energéticos y datos de consumo real a fin de caracterizar la demanda en catorce hospitales públicos de la región de Castilla y León, para su uso potencial en la gestión energética de los edificios. Cabe mencionar también, el estudio realizado de manera similar en el Reino Unido sobre caracterización energética de los hospitales públicos, para determinar la robustez de los edificios frente al cambio climático (Short, et al., 2012).

La simulación de modelos energéticos es la herramienta más potente y ampliamente utilizada para la optimización y mejora de eficiencia energética de edificios existentes. Sin embargo, la representación detallada de las condiciones de operación reales de los edificios mediante modelos energéticos es dificultosa debido a su complejidad y al gran número de variables independientes relacionadas (Coakley, et al., 2014) (Tulsyan, et al., 2013). Por lo tanto, un enfoque de análisis energético global de estos edificios plantea importantes limitaciones en cuanto a coste de tiempo y coste computacional.

Generalmente, la cuantificación del uso de la energía en los edificios se realiza mediante cálculo con modelos de simulación energética, medidas y monitorización in situ o con un enfoque híbrido donde se usan ambos métodos de forma paralela (Wang & Yan, 2012). Los modelos energéticos de edificios existentes se utilizan ampliamente para investigaciones en las que se plantea un análisis de optimización y mejora de eficiencia energética, para respaldar la toma de decisiones, como herramienta para evaluar la idoneidad de diferentes opciones de rehabilitación frente a su rendimiento económico y energético (Royapoor & Roskilly, 2015) (Coakley, et al., 2014) (Tulsyan, et al., 2013) (Heo, et al., 2015) (Roberti, et al., 2015). Su uso generalizado se debe a que son capaces de predecir el comportamiento del edificio sobre unas condiciones inobservadas previas, lo cual permite hacer alteraciones en su configuración y monitorizar su impacto en el comportamiento energético (Coakley, et al., 2014). Sin embargo, éstos requieren cada vez más un mayor nivel de exactitud para realizar estudios más profundos y significativos (Royapoor & Roskilly, 2015), lo cual viene respaldado por la creciente disponibilidad de datos energéticos monitorizados más detallados.

Aun así, la representación rigurosa de las condiciones de operación reales de los edificios mediante modelos energéticos es dificultosa debido a su complejidad y al gran número de variables independientes relacionadas, lo cual provoca inexactitud e incertidumbre en los resultados. Este problema se intenta salvar mediante la calibración de los modelos, la cual se consigue mediante la aproximación de los resultados de la simulación con los datos medidos in situ (Coakley, et al., 2014) (Tulsyan, et al., 2013) (Royapoor & Roskilly, 2015). Además, permite cuantificar la exactitud de los mismos, la cual a pesar del gran avance actual en la materia todavía sufre aún una gran infra-determinación en los parámetros de entrada (Raftery, et al., 2011).

Numerosos autores han demostrado recientemente la importancia de la calibración, en particular para modelos cuyo propósito es evaluar diferentes opciones de rehabilitación energética (Heo, et al., 2015) (Roberti, et al., 2015) (Coakley, et al., 2014). Sin embargo, la calibración es un problema sobre-especificado e infra-determinado que da como resultado múltiples soluciones, es decir, múltiples modelos pueden generar resultados compatibles con el conjunto de datos monitorizados, pero cuyas estructuras no son compatibles entre sí (Coakley, et al., 2014) y no necesariamente representan de manera rigurosa las características constructivas y térmicas del edificio real. La posibilidad de obtener un modelo calibrado con parámetros alejados de los valores reales es especialmente alta en edificios existentes con gran incertidumbre en la descripción de los sistemas constructivos de la envolvente (Roberti, et al., 2015).

El problema de la incertidumbre del modelo es un problema importante para analizar de manera global la calibración de los modelos energéticos, el cual se omite de manera generalizada en los estudios y no se tiene en cuenta en los criterios de validación de los estándares actuales (Coakley, et al., 2014). Varios estudios recomiendan la identificación de la magnitud y naturaleza de las incertidumbres en los parámetros de entrada para que los estudios de evaluación de rehabilitación

energética se puedan realizar con mayor fiabilidad (Coakley, et al., 2014) (Heo, et al., 2015) (Royapoor & Roskilly, 2015). En el caso de edificios existentes dependen en gran medida de la tipología de edificio, zona climática, ocupación, patrones de uso, y disponibilidad de datos constructivos y monitorizados.

En todo caso, la cuantificación de las incertidumbres depende en gran medida del nivel de detalle de la recolección de datos, lo que impacta en gran medida en la credibilidad de las predicciones del modelo (Heo, et al., 2014). En este proceso es fundamental identificar los parámetros del modelo que tienen un mayor impacto en los resultados (Heo, et al., 2015), lo cual se puede conseguir realizando un análisis de sensibilidad de variables. Existen varios métodos para realizar este análisis, sin embargo, la elección del método adecuado depende del propósito de la investigación, coste computacional de los modelos, número de variables de parámetros de entrada, etc. El método recomendado para el análisis energético de edificios existentes es el de regresión o Bayesiano y, en el caso de que produzca una proporción grande de varianza, el método de meta-modelo se puede aplicar sin realizar simulaciones extra (Tian, 2013).

Varios estudios recientes incorporan estos avances metodológicos en sus investigaciones en edificios residenciales y oficinas, adaptados a sus respectivos casos de estudio y características funcionales (Roberti, et al., 2015) (Vesterberg, et al., 2014) (Heo, et al., 2015) (Royapoor & Roskilly, 2015). Por ejemplo, Roberti et al. (2015) proponen una metodología de calibración de modelos energéticos de edificios históricos en los que la definición de sus sistemas constructivos es incierta, con el fin de caracterizar su consumo energético y evaluar alternativas de rehabilitación energética. Por lo tanto, la metodología se centra en ayudar a definir los parámetros de la envolvente, calibrando los parámetros más relevantes, de acuerdo a un análisis de sensibilidad, frente a las temperaturas interiores monitorizadas.

Por lo tanto, para hacer uso de todo el potencial que ofrecen los últimos avances técnicos y herramientas, es necesario diseñar un protocolo de aplicación de la metodología específico, dependiendo del propósito de la investigación, su aplicación, tipología de edificio, ocupación y patrones de uso, disponibilidad de datos constructivos y monitorizados, zona climática, etc.

El objetivo principal de este trabajo es el desarrollo de una metodología que permita evaluar el comportamiento energético de la habitación tipo de los hospitales, en las diferentes zonas climáticas del sur de España, como punto de partida para la búsqueda de estrategias de mejora energética, mediante sistemas pasivos y de la envolvente térmica, para reducir la demanda y el consumo energético, así como mejorar las condiciones de confort, dentro de un contexto de viabilidad técnica y económica.

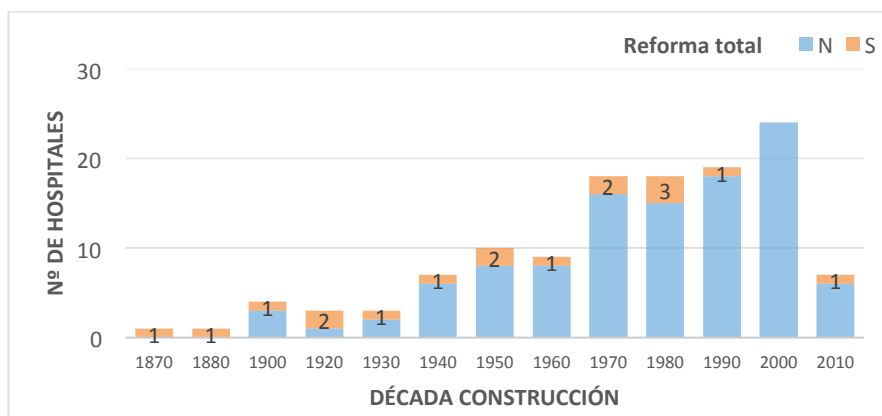


Fig. 1 Número de hospitales andaluces construidos por década con y sin reforma total



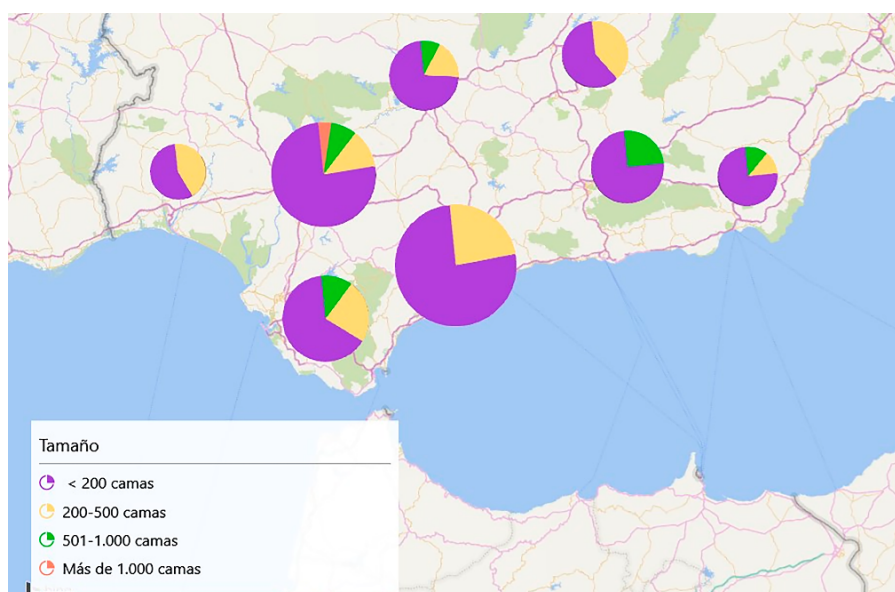
Fig. 2 Hospital universitario Virgen Macarena (www.geodruid.com, s.f.)

### 3 Metodología

Para la consecución del objetivo planteado se propone un enfoque metodológico basado en un procedimiento de análisis experimental a partir de la monitorización de variables ambientales y energéticas, la calibración y la predicción del comportamiento energético empleando modelos de simulación energética y de iluminación natural. Esta metodología está siendo actualmente aplicada a un caso de estudio, una habitación tipo del Hospital Virgen Macarena de Sevilla (Fig. 2). La metodología a aplicar se organiza en tres fases:

### ***3.1 Identificación, clasificación y selección de muestras representativas***

En esta primera fase se recopila información, tomando como base el Catálogo Nacional de Hospitales 2015 (Ministerio de Sanidad, Servicios Sociales e Igualdad, 2014), de los hospitales en funcionamiento y sus características funcionales y asistenciales. Se complementa esta información con características constructivas, geométricas, año de construcción, etc., a partir de datos catastrales e inspección visual, junto con la definición de la zona climática según el Código Técnico de la Edificación (CTE), con el fin de elaborar una base de datos del parque de edificios hospitalarios de Andalucía (Fig. 1 y 3). A partir de esta base de datos ampliada de acuerdo al propósito de esta investigación, se realizará una clasificación que permita identificar las tipologías representativas, dado que la mayoría de hospitales públicos previos a la NBE CT-79 siguen unas pautas de diseño y configuración comunes (Isasi & Pieltain, 2000).



**Fig. 3** Distribución de hospitales por provincias según tamaño, definido por su número de camas

Los hospitales presentan diferentes zonas funcionales, por lo que se simplifica el análisis limitando el estudio a las zonas de hospitalización, ya que ocupan la proporción de superficie más representativa y se encuentran en funcionamiento de forma continua, por lo que se presume un mayor impacto en la mejora de la eficiencia energética. Por lo tanto, se plantea un enfoque de estudios detallados de muestras representativas para extrapolar sus resultados a otros hospitales de similares características, en vez de un estudio de colectivo de menor resolución, lo

cual simplifica enormemente el proceso de toma de datos. Por último, se limita también los elementos constructivos a optimizar a los sistemas de envolvente térmica, con el fin de acotar el propósito del modelado energético y reducir el número de parámetros a considerar.

Tras la identificación se procede a realizar una caracterización por tipologías del parque hospitalario mediante un análisis estadístico de las principales características de estudio: constructivas, funcionales, asistenciales, etc.

### ***3.2 Evaluación y análisis energético***

Esta fase se desarrolla en dos tareas:

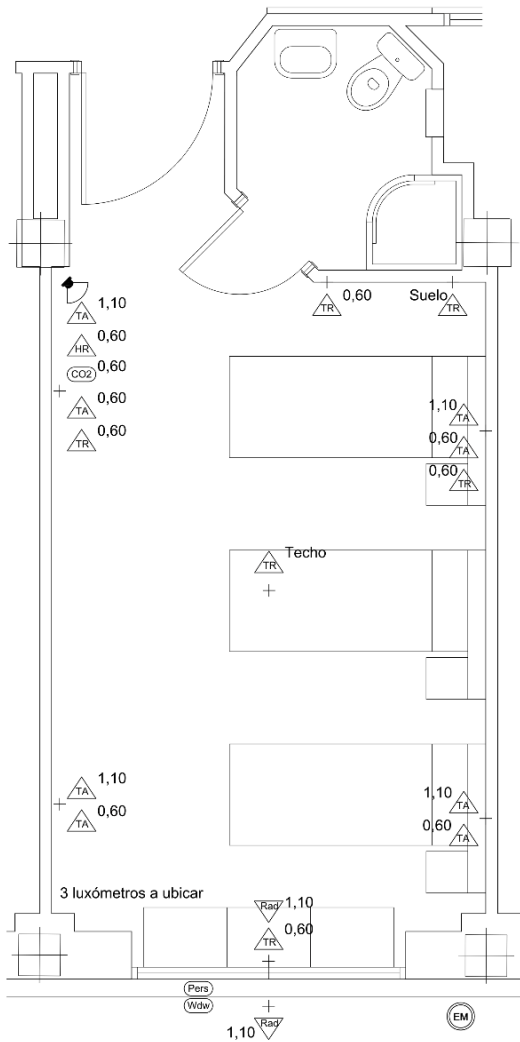
#### **3.2.1 Medición in situ**












Se realiza una caracterización energética de las muestras seleccionadas mediante medidas, pruebas de reconocimiento in situ y monitorización, en condiciones reales de utilización, durante un periodo de nueve meses, incluyendo verano e invierno, de variables ambientales y energéticas interiores y exteriores, confort, consumos y condiciones de funcionamiento de la habitación tipo:

- Monitorización de condiciones ambientales (temperatura y humedad relativa interior y exterior, temperatura superficial de paramentos interiores y exteriores, niveles de CO<sub>2</sub> y niveles de iluminancia), gestionado por un sistema logger múltiple el cual registrará la información medida por las sondas y sensores en intervalos horarios (Fig. 4).
- Monitorización del consumo pormenorizado de energía en la habitación, mediante un medidor de consumo eléctrico y de energía térmica.
- Estudios de termografía infrarroja de los cerramientos para detectar los puntos donde se producen pérdidas energéticas a través del cerramiento, y de presurización y despresurización, para comprobar el grado de estanqueidad de la envolvente mediante un equipo BlowerDoor.
- Elaboración de un modelo de encuesta a los usuarios, para obtener información sobre los patrones de uso y operación y sensación térmica.

#### **3.2.2 Elaboración de modelo energético inicial**

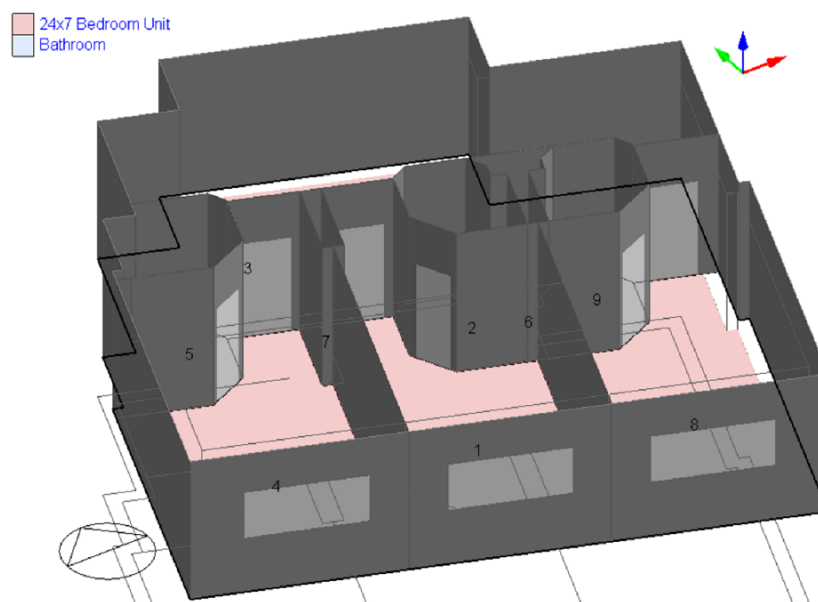
Se elaborará un modelo energético inicial mediante la herramienta DesignBuilder, sobre el cual se realizará un análisis de sensibilidad de variables para obtener una clasificación de los parámetros más influyentes en los resultados y cuantificar su nivel incertidumbre. En este caso particular se considera que el método de regresión



	Weather Station		Relative humidity sensor
	Air temperature sensor		Carbon dioxide transmitter
	Surface temperature sensor		Photometer
	Radiant temperature sensor		Pyranometer
	Window/Blind opening meter		Presence detector
			



**Fig. 4** Planta de habitación tipo del Hospital Virgen Macarena y equipos de monitorización



**Fig. 5** Modelo energético en DesignBuilder de habitación tipo y adyacentes Hospital Macarena

lineal es el más adecuado, ya que se presume una mayor incertidumbre en los parámetros característicos de la envolvente térmica (Fig, 5).

### 3.2.3 Calibración y validación del modelo energético

Se calibrarán en un primer paso los parámetros con mayor incertidumbre y en un segundo paso se calibrará el modelo frente a los datos monitorizados de temperaturas interiores y consumo energético, hasta alcanzar un margen de error aceptable, ya que el propósito de la investigación es evaluar diferentes alternativas de rehabilitación energética frente a su rendimiento termo-económico y la mejora de confort térmico adaptativo asociada.

### 3.2.4 Evaluación del comportamiento energético y ambiental

Se evaluará el comportamiento energético y ambiental de las condiciones interiores, en su situación actual, para lo que se obtendrán predicciones mediante la simulación de los modelos energéticos: demanda energética, temperaturas interiores y niveles de iluminación natural de la muestra en su estado actual, anual y horaria, para cada día y en cada periodo estacional para su posterior comparación

frente a requisitos de confort adaptativo (UNE-EN 15251:2008/ PNE-prEN 16798-1) y demanda energética.

### ***3.3 Estrategias de mejora de los sistemas pasivos***

En esta última fase de elaboran un conjunto de estrategias de mejora de los sistemas pasivos de acondicionamiento ambiental. Se desarrolla mediante dos tareas:

#### **3.3.1 Evaluación del comportamiento energético y ambiental**

A partir de la evaluación ambiental y consumo energético estacional del caso de estudio, se realiza un estudio de optimización que permita determinar un conjunto de estrategias de mejora de los sistemas pasivos y de la envolvente, teniendo en cuenta la clasificación de los parámetros más influyentes obtenidos mediante el análisis de sensibilidad de variables. Se realizará una definición constructiva y de variables energéticas mediante valoración de hipótesis simples y combinadas de estrategias sobre sistemas pasivos/envolvente (nivel de aislamiento, composición y tamaño del hueco, sistemas de sombreado, etc.) para su implementación en el modelo calibrado. A partir de estos modelos, se obtendrá la predicción de la demanda energética, temperaturas y niveles de iluminación de la muestra para cada intervención, anual y horaria para cada día con condiciones climáticas extremas y medias para cada periodo estacional.

#### **3.3.2 Evaluación y valoración ambiental y energética de las estrategias propuestas**

Se compararán los resultados obtenidos de demanda y consumos energéticos, temperaturas y niveles de iluminación frente a indicadores y/o requisitos normativos. Además, se realizará un análisis del comportamiento ambiental y térmico estacional de cada estrategia de rehabilitación energética y el impacto de cada propuesta de actuación frente a las condiciones iniciales para evaluar su idoneidad termo-económica frente al rendimiento energético, mediante periodos de amortización simples.

## **4 Conclusión**

La necesaria adecuación energética del parque hospitalario andaluz, debe plantearse mediante un proceso de rehabilitación, en un proceso complejo y lleno de incer-

tidumbres frente a los resultados a alcanzar. Para optimizar este proceso es necesario aplicar una metodología específica de acuerdo a su tipología funcional y constructiva, que se propone en este trabajo y cuya puesta en práctica ha comenzado sobre una habitación tipo del Hospital Virgen Macarena de Sevilla.

Este trabajo propone una metodología cuya aplicación permitirá ofrecer una caracterización energética de la habitación tipo hospitalaria, así como su potencial de mejora, como paso previo a la aplicación de estrategias de rehabilitación energética al parque hospitalario andaluz. La metodología propuesta se organiza en tres fases, basadas en la identificación, clasificación y selección de muestras representativas de hospitales del territorio andaluz; la evaluación y análisis energético de los casos de estudio y la elaboración de un conjunto de estrategias de mejora de los sistemas pasivos de acondicionamiento ambiental.

## Agradecimientos

Este estudio se desarrolla vinculado al proyecto de investigación SUB-UMBRA: “La rehabilitación energética de edificios de uso terciario en clima Mediterráneo mediante la optimización de los sistemas de protección solar”, (Ref. BIA2014-53949-R) dentro de los proyectos de I+D+i del programa estatal de investigación, desarrollo e innovación orientada a los Retos de la sociedad, convocatoria 2014 (Ministerio de Economía y Competitividad).

## Referencias

- ASHRAE (2002). Guideline14-2002: measurement of energy and demand savings. Atlanta: GA 30329: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- Buonomano, A., Calise, F., Ferruzzi, G. & Palombo, A. (2014). Dynamic energy performance analysis: Case study for energy efficiency retrofits of hospital buildings. *Energy*, Issue 78, p. 555–572.
- Buonomano, A., Calise, F., Ferruzzi, G. & Vanoli, L. (2014). A novel renewable polygeneration system for hospital buildings: Design, simulation and thermo-economic optimization. *Applied Thermal Engineering*, 1-2(67), pp. 43-60.
- Buonomano, A., Montanaro, U., Palombo, A. & Santini, S. (2016). Dynamic building energy performance analysis: A new adaptive control strategy for stringent thermohygro-metric indoor air requirements. *Applied Energy*, Issue 163, p. 361–386.
- Coakley, D., Raftery, P. & Keane, M. (2014). A review of methods to match building energy simulation models to measured data. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Issue 37, p. 123–141.

- Heo, Y.; Augenbroe, G.; Graziano, D.; Muehleisen, R. T. & Guzowski, L. (2015). Scalable methodology for large scale building energy improvement: Relevance of calibration in model-based retrofit analysis. *Building and Environment*, Issue 87, p. 342–350.
- Heo, Y., Graziano, D., Guzowski, L. & Muehleisen, R. (2014). Evaluation of calibration efficacy under different levels of uncertainty. *Journal of Building Performance Simulation*, 8(3), pp. 135-144.
- Isasi, J. & Pieltain, A. (2000). *Hospitales: la arquitectura del Insalud, 1986-2000*. Madrid: INSALUD.
- Ministerio de Sanidad, Servicios Sociales e Igualdad (2014). *Catálogo Nacional de Hospitales*. Madrid: Secretaría General Técnica.
- Raftery, P., Keane, M. & O'Donnell, J. (2011). Calibrating whole building energy models: An evidence-based methodology. *Energy and Buildings*, Issue 43, p. 2356–2364.
- Roberti, F., Oberegger, U. F. & Gasparella, A. (2015). Calibrating historic building energy models to hourly indoor air and surface temperatures: Methodology and case study. *Energy and Buildings*, Issue 108, p. 236–243.
- Royapoor, M. & Roskilly, T. (2015). Building model calibration using energy and environmental data. *Energy and Buildings*, Issue 94, p. 109–120.
- Short, C. A., Lomas, K. J., Giridharan, R. & Fair, A. J. (2012). Building resilience to overheating into 1960's UK hospital buildings within the constraint of the national carbon reduction target: Adaptive strategies. *Building and Environment*, Issue 55, p. 73–95.
- Tian, W., 2013. A review of sensitivity analysis methods in building energy analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Issue 20, p. 411–419.
- Tulsyan, A., Dhaka, S., Mathur, J. & Yadav, J. V. (2013). Potential of energy savings through implementation of Energy Conservation Building Code in Jaipur city, India. *Energy and Buildings*, Issue 58, p. 123–130.
- Vesterberg, J., Andersson, S. & Olofsson, T., 2014. Robustness of a regression approach, aimed for calibration of whole building energy simulation tools. *Energy and Buildings*, Issue 81, p. 430–434.
- Wang, L. M. P. P. X. (2012). Uncertainties in energy consumption introduced by building operations and weather for a medium-size office building. *Energy and Buildings*, Issue 53, p. 152–158.
- Wang, S. & Yan, C. X. F. (2012). Quantitative energy performance assessment methods for existing buildings. *Energy and Buildings*, Issue 55, p. 873–888.
- [www.geodruid.com](http://www.geodruid.com), s.f. [www.geodruid.com](http://www.geodruid.com). [En línea] [Último acceso: septiembre 2016].
- Zorita, A., Fernández-Temprano, M. A., García-Escudero, L. A. & Duque-Perez, O. (2016). A statistical modeling approach to detect anomalies in energetic efficiency of buildings. *Energy and Buildings*, Issue 110, p. 377–386.