

OPTIMIZACIÓN MULTI-OBJETIVO DE CUBÍCULOS: MINIMIZACIÓN DEL COSTE Y DEL IMPACTO AMBIENTAL

CARRERAS, Joan (1); BOER, Dieter (1); GUILLÉN-GOSÁLBEZ, Gonzalo (2,3); CABEZA, Luisa (4);
MEDRANO, Marc (4); JIMÉNEZ, Laureano (2)

joan.carreras@urv.cat

(1) Universitat Rovira i Virgili, Departament d'Enginyeria Mecànica, Tarragona (Espanya)

(2) Universitat Rovira i Virgili, Departament d'Enginyeria Química, Tarragona (Espanya)

(3) The University of Manchester, Centre for Process Integration, School of Chemical Engineering and Analytical Science, Manchester (UK)

(4) Universitat de Lleida, GREA Innovació Concurrent, Lleida, (Espanya)

RESUMEN

Actualmente el sector de los edificios es responsable de, aproximadamente, un 40% del consumo de energía a nivel mundial. La mayor parte de esta energía se utiliza para la iluminación, la calefacción y el aire acondicionado. Las estrategias de eficiencia energética, como el aislamiento térmico de edificios, mejoran el comportamiento energético del edificio sin comprometer el confort.

La tendencia actual promueve grandes espesores de aislamiento térmico lo cual permite una reducción del consumo de energía en el edificio. Sin embargo, el grado en el que esta estrategia reduce el impacto medioambiental aún es poco conocido. Amplios espesores de aislamiento no necesariamente implican una reducción del impacto ambiental. No considerar el impacto asociado a los materiales de aislamiento puede llevar a soluciones en las que el ahorro de energía podría alcanzarse a costa de aumentar las cargas medioambientales.

Este estudio presenta una metodología para determinar el óptimo espesor de aislamiento para las superficies externas de los edificios. Nuestro enfoque se basa en un modelo de optimización multi-objetivo que minimiza simultáneamente el coste y el impacto ambiental asociado tanto al consumo de energía durante la fase operativa del edificio, como al consumo asociado a la generación de los materiales de construcción. Las cargas térmicas de los cubículos modelados se calcularon utilizando EnergyPlus, un programa de simulación energética de edificios ampliamente utilizado. El impacto ambiental se cuantificó siguiendo la metodología de Análisis del Ciclo de Vida (ACV). En este trabajo una herramienta de optimización multi-objetivo basada en un algoritmo genético (NSGA-II): JEPlus + EA se combina con EnergyPlus para desarrollar el proceso de optimización.

Esta metodología fue aplicada a un caso de estudio donde se considera una construcción tipo cubículo situada en Lleida. Tomando como base un cubículo estándar sin aislamiento, se han identificado soluciones que reducen alrededor de un 40% tanto el coste económico como el impacto ambiental. Se han considerado tres materiales de aislamiento: Poliuretano (PU), poliestireno (XPS) y lana mineral (MW). La solución óptima desde una perspectiva ambiental se obtiene mediante el uso de MW con un espesor de 23 cm en todas las superficies externas, mientras que el óptimo económico se obtiene mediante el uso de PU con un grosor de aislamiento de 8 cm en la fachada exterior norte, 6 cm en la sur, 7 cm en la este y la oeste y 9 cm en el techo. Las soluciones óptimas muestran también importantes mejoras económicas y ambientales en comparación con cubículos construidos según los requisitos de la legislación española.

Palabras clave: Optimización multi-objetivo, Análisis de Ciclo de Vida, Edificios, Aislamiento

1. Introducción

El sector edificios es responsable de aproximadamente el 40% del consumo total de energía a nivel mundial. La mayor parte de esta energía se utiliza para la iluminación, calefacción, refrigeración y aire acondicionado [1].

Muchos países de la OCDE han adoptado medidas para mejorar la eficiencia energética en el sector de la construcción. La Unión Europea (UE) ha aprobado un conjunto de leyes para asegurar el cumplimiento de sus ambiciosos objetivos climáticos y energéticos para el año 2020. En marzo de 2007 la Comisión Europea publicó el plan 20-20-20, que incluye un objetivo para mejorar un 20 % la eficiencia energética en la Unión Europea.

Para cumplir con este objetivo son múltiples las estrategias de eficiencia energética que pueden aplicarse. El aislamiento de edificios es un claro ejemplo. Un aislamiento adecuado disminuye la demanda de calefacción y refrigeración sin comprometer el confort en el interior del edificio.

La aplicación de más aislamiento tiene el efecto de reducir el consumo de energía. Pero otro aspecto importante a considerar es cómo esto afecta al impacto medioambiental global. Se debe considerar no sólo la reducción del impacto ambiental durante la fase de operación, sino también el impacto ambiental en la fase de construcción y en la de demolición. Este impacto ambiental puede cuantificarse siguiendo la metodología de análisis de ciclo de vida (ACV). Un nicho de investigación aparece en este campo, ya que el impacto ambiental de los edificios, incluso para las nuevas construcciones, apenas se ha evaluado de forma sistemática [2–4].

El propósito de este trabajo es analizar cómo el espesor de un material de aislamiento afecta el consumo de energía, el coste total y el impacto ambiental de un edificio situado en Lleida (España). El análisis se realiza mediante una técnica de optimización multi-objetivo (MOO). A partir de estos resultados determinamos los valores óptimos para obtener el coste mínimo, el mínimo impacto ambiental (que por lo general no se corresponde con el mismo espesor de aislamiento), e mostraremos y analizaremos el balance entre ambos objetivos.

2. Metodología

2.1. Implementación computacional

Para evaluar el consumo de energía del edificio se utilizará el programa de simulación energética EnergyPlus. La energía consumida durante la vida útil del edificio nos ayuda a evaluar el coste económico operacional y el impacto ambiental. Los datos climáticos de Lleida han sido utilizados para las simulaciones.

Al tratar con múltiples parámetros de diseño, como en el caso del presente trabajo, el número final de resultados puede ser muy elevado y, por lo tanto, una exhaustiva y pesada búsqueda sería necesaria. Sin embargo, cuando el espacio de búsqueda es tan grande, es más conveniente recurrir a algoritmos de optimización rigurosos. En este trabajo una herramienta de optimización multi-objetivo que funciona con un algoritmo genético (NSGA-II): JEPlus + EA [5] se combina con EnergyPlus. El modelo de simulación del edificio podría acoplarse con otros algoritmos de optimización, de una manera similar como otros autores han hecho en trabajos anteriores[6].

2.2. Funciones objetivo

2.2.1. Indicadores económicos

Se considera el coste de la construcción del cubículo más el coste asociado a la electricidad consumida para climatizar el espacio durante la vida útil del edificio. El objetivo es lograr el coste total mínimo.

Se ha realizado un inventario de los materiales utilizados para la construcción del cubículo, la cantidad utilizada y el coste correspondiente. En cuanto a los precios de los materiales de construcción se ha utilizado la base de datos del ITeC [7]. El precio de cada cubículo viene dado por:

$$Cost_{cub} = \sum_k Price_k \cdot Quant_k \quad (1)$$

Donde $Cost_{cub}^k$ es el coste total del cubículo, $Price_k$ es el precio por kilogramo de materia prima y $Quant_k$ es la cantidad correspondiente en kilogramos de material k utilizada en la construcción (p.e. kg de hormigón). El consumo de electricidad se multiplica por el coste de la electricidad en el sector doméstico en España (0,16 €/ kWh[8]) considerando una tasa anual de inflación del 5%[9]. La ecuación se presenta a continuación:

$$Cost_{elec_n} = \sum_n Cons_{elec} \cdot PCost_{elec} \cdot (1+Inf)^n \quad (2)$$

Donde $Cost_{elec_n}$ es el coste de la electricidad a lo largo de n años, $Cons_{elec}$ es la electricidad que se consume en calefacción y refrigeración anualmente en kWh, $PCost_{elec}$ es el coste del kWh de electricidad en España e Inf es el incremento anual del coste de la electricidad.

2.2.2. Indicadores ambientales

El impacto ambiental causado por la energía consumida y los materiales de construcción se cuantifica mediante la evaluación del análisis de ciclo de vida (ACV), basado en el Eco-indicador 99 (EI99) [10]. Esta información ha sido extraída de la base de datos EcoInvent [11]. Este método divide el impacto en tres categorías diferentes (salud humana, calidad del ecosistema y agotamiento de recursos) que a su vez están compuestas por 10 categorías de impacto específicas. La suma de las tres categorías de impacto se traduce en un solo valor agregado. La evaluación del impacto viene dada por:

$$Imp_{cub} = \sum_k Imp_k \cdot Quant_k \quad (3)$$

Donde Imp_{cub} es el impacto EI99 total del cubículo, Imp_k es el coeficiente de impacto por kilogramo del componente k (una información que está disponible en la base de datos de EcoInvent), y $Quant_k$ es la cantidad correspondiente en kilogramos de cada k componente.

En el presente estudio se han considerado tres fases diferentes: fabricación, desmantelamiento y operacional. En la fase de fabricación y la de desmantelamiento se ha elaborado un inventario de todos los materiales, la cantidad e impacto correspondientes. Datos del sistema de producción de electricidad de España se han utilizado para la fase operacional[11].

2.3. Procedimiento resolutivo

La solución del modelo multi-objetivo viene dada por un conjunto de puntos de Pareto [6, 12] que representan el compromiso óptimo entre los objetivos considerados. En nuestro estudio los modelos presentados deben lograr dos objetivos diferentes: mínimo coste y mínimo impacto ambiental.

3. Caso de estudio

3.1. Descripción del modelo

Los cubículos experimentales tienen dimensiones idénticas (cinco paredes planas de 2,4 x 2,4 x 0,15 m), pero diferentes materiales (distintos tipos de ladrillos y materiales de aislamiento) con el fin de evaluar su rendimiento. La estructura del cubículo está hecha de cuatro pilares de mortero con barras de refuerzo, uno en cada borde de la celda. La base consiste en una plataforma de hormigón de 3 x 3 m. Las paredes están compuestas de 6 capas de material, enumeradas a continuación de la más externa a la interna: un acabado de mortero de cemento, una estructura de ladrillos huecos, una cámara de aire de 5 cm, una capa de aislamiento, ladrillos perforados y una capa de enlucido de yeso. El techo fue construido con vigas de hormigón y 5 cm de losa de hormigón. Una capa de yeso conforma el acabado interior. El material aislante se coloca sobre el hormigón, protegido con un techo de mortero de

cemento con una pendiente del 3% y una doble membrana de asfalto. En el análisis también se considera un cubículo de referencia sin aislamiento.

3.2. Especificaciones del modelo

Para la simulación del cubículo, se considera una temperatura de consigna interior de 24 ° C para todo el año [13]. Una bomba de calor con un COP de 3 cubre la demanda de calefacción y refrigeración. No se han integrado en el modelo ni ventanas ni puertas. No se considera ni ventilación natural ni mecánica pero si una tasa de infiltración fija de 0.12 RAH (renovaciones de aire por hora) [14]. No se considera ninguna carga interna.

Asumimos una vida útil del edificio de 20 años. En referencia al coste económico de los materiales de construcción suponemos que la inversión total se asume el primer año. En cuanto a la electricidad consideramos un precio de 0,16 €/ kWh con un 5% de incremento anual del precio.

3.3. Caso de estudio I: Grosor de aislamiento homogéneo

El caso de estudio I aborda el análisis de un cubículo con el sistema de construcción especificado. En este caso el espesor de aislamiento será variado de manera uniforme en las cuatro superficies verticales y en el techo de 1 a 25 cm. Inicialmente se evaluarán soluciones parciales, por un lado la solución económica óptima y por el otro la solución con menor impacto ambiental. Por último se analizará un conjunto de soluciones de Pareto que representan el equilibrio óptimo entre los dos objetivos en conflicto.

3.4. Caso de estudio I: Grosor de aislamiento heterogéneo

Este análisis seguirá la misma estructura que el caso de estudio I pero, en este caso, en vez de cambiar el espesor de aislamiento de todas las superficies de manera uniforme, se analizará el efecto de diferentes espesores para cada superficie.

4. Resultados

4.1. Caso de estudio I: Grosor de aislamiento homogéneo

4.1.1. Análisis económico

Cuando el espesor de aislamiento de las superficies de los cubículos aumenta, el coste del material aumenta linealmente, por lo tanto, más material de aislamiento implica un mayor coste del cubículo. Sin embargo, el coste de la energía disminuye a medida que aumenta el espesor de aislamiento. Por lo tanto, hay dos efectos contrapuestos, y la solución de coste mínimo corresponde al punto que representa el equilibrio óptimo entre las dos variables económicas. En este caso, la solución de coste mínimo implica un espesor de 8 cm en el caso de utilizar PU (poliuretano), 10 cm para el EPS (poliestireno) y 11cm para la MW (lana mineral) (Fig. 1.a).

Destacar que, como se esperaba, la solución con el mínimo coste de energía no es la que tiene el mejor rendimiento económico. Por lo tanto, dejar de lado el coste de los materiales, conduce a una solución subóptima. Lo mismo puede decirse para el análisis de la solución de mínimo impacto ambiental.

4.1.2. Análisis ambiental

El impacto de la energía disminuye a medida que aumenta el espesor de aislamiento, mientras que el impacto del material aumenta linealmente con el espesor de aislamiento. La solución de mínimo impacto implica un espesor de 8 cm en el caso de utilizar PU, 12 cm para el EPS, y 23 cm para el MW (Fig.1.b). El espesor con un impacto mínimo para el MW es significativamente más elevado que el correspondiente a los otros materiales. Esto ocurre porque el impacto ambiental de la MW es mucho más bajo que los otros. Específicamente, esto es debido a que la MW presenta un bajo impacto

relacionado con el agotamiento de los combustibles fósiles, que es diez veces menor que el impacto del PU y el EPS.

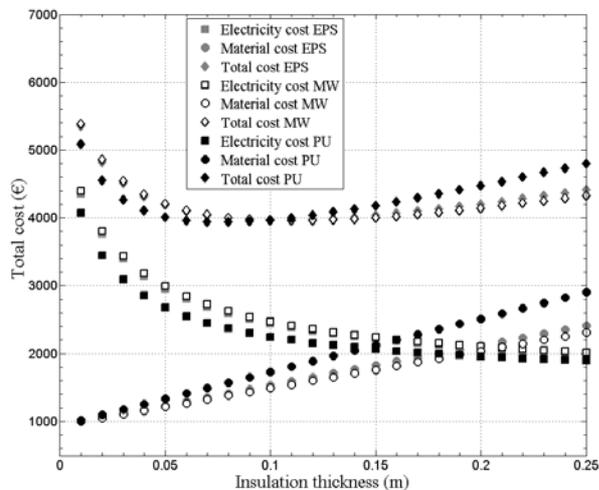


Figura 1.a: Simulaciones obtenidas a partir de la variación del coste del cubículo con el espesor de aislamiento de PU, MW y EPS

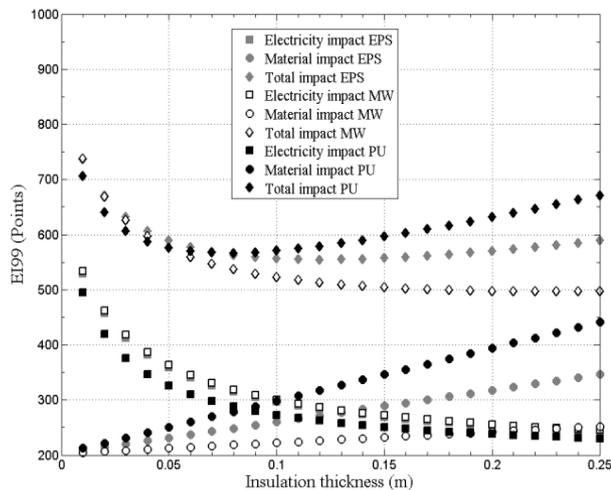


Figura 1.b: Simulaciones obtenidas a partir de la variación del impacto ambiental del cubículo con el espesor de aislamiento de PU, MW y EPS

4.1.3. Análisis multi-objetivo

En esta sección se analiza el coste total y el impacto ambiental, de energía y materiales, al mismo tiempo. Cada punto en la figura 2 (Eco-indicador 99 vs coste) representa una combinación diferente de espesores de aislamiento. Para cada material de aislamiento, obtenemos las soluciones extremas de cada objetivo (es decir, el coste mínimo y el mínimo impacto ambiental). Entre estos dos puntos, se obtienen un conjunto de alternativas “trade-off”, óptimas todas ellas.

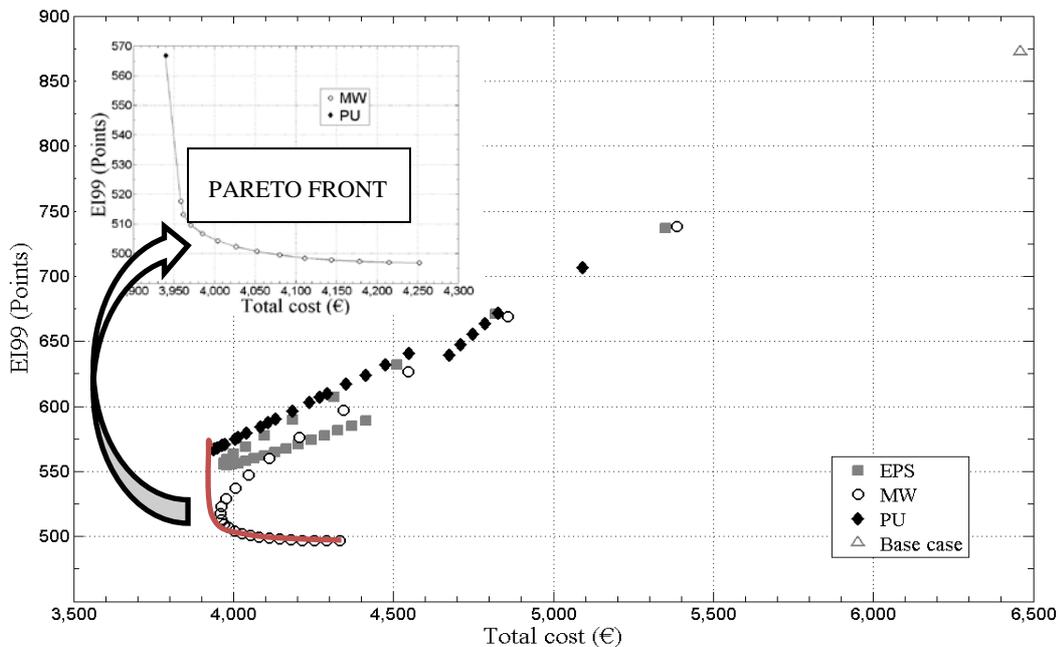


Figura 2: Soluciones obtenidas a partir de la variación simultánea de todos los valores de espesor en el espacio 2-D de impacto ambiental (Eco-indicador 99) vs coste total (caso estudio I)

Por lo que refiere al PU, ya que la mejor solución es la misma para ambos objetivos, alcanzamos el punto de utopía, que por definición minimiza / maximiza todas las funciones objetivo del problema multi-objetivo a la vez. En cuanto al caso del EPS, el mejor espesor de aislamiento es de 10 cm (económico), mientras que la mejor solución ambiental implica un espesor de 12 cm. Por último, los mejores espesores de aislamiento para el caso MW son 12 cm (económico) y 23 cm (ambiental).

4.2. Caso de estudio II: Grosor de aislamiento heterogéneo

En este caso de estudio aplicamos la misma metodología que en el caso de estudio anterior pero esta vez considerando la combinación de distintos grosores de aislamiento en las superficies externas. El análisis muestra que se logra el mejor desempeño ambiental mediante la aplicación MW con un espesor de 23 cm en todas las superficies externas, mientras que la alternativa con mejores resultados económicos implementa PU con un espesor de aislamiento de 8 cm en la fachada exterior norte, 6 cm en el sur, 7 cm en la este y Oeste, y 9 cm en el techo.

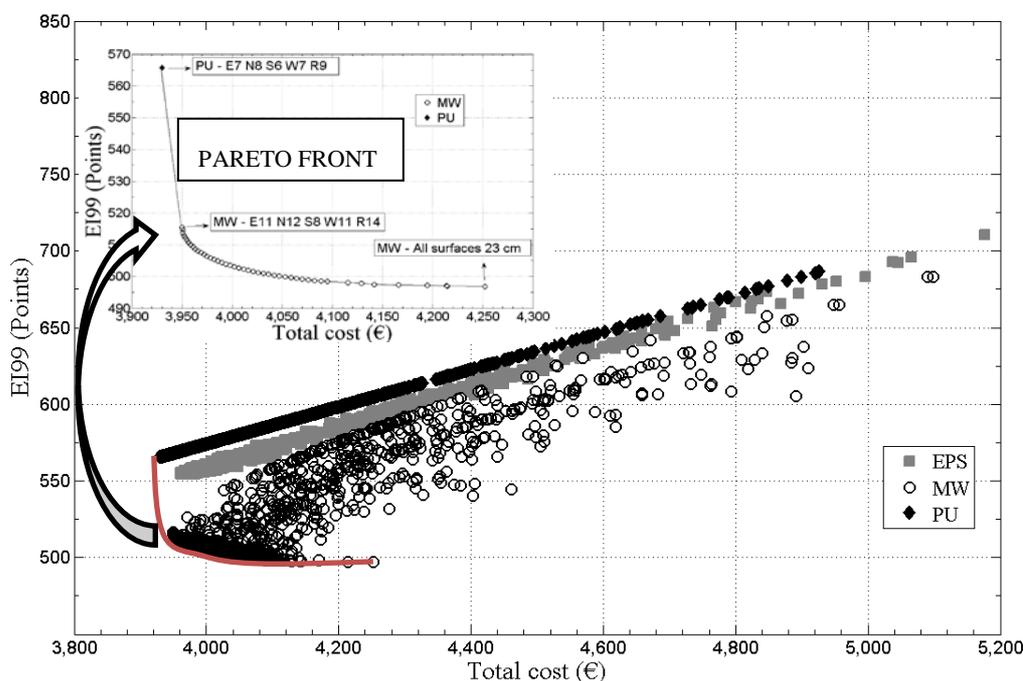


Figura 3: Soluciones obtenidas a partir de la variación simultánea de todos los valores de espesor en el espacio 2-D de impacto ambiental (Eco-indicador 99) vs coste total (caso estudio II)

5. Discusión

Algunas preguntas importantes aparecen después del análisis de los resultados: ¿Cuánto mejora el comportamiento de los cubículos con grosores de aislamiento óptimo en comparación con el caso de referencia? ¿Son significativas las diferencias entre las mejores soluciones de aislamiento homogéneo y heterogéneo? ¿Las soluciones óptimas del presente estudio lo serían también según las directivas actuales de eficiencia energética en edificios?

La Tabla 4 muestra las diferentes soluciones óptimas extremas de los casos I y II y sus mejoras (alrededor de 35 - 40% mejor) con respecto al caso base (sin aislamiento). Estos resultados confirman la importancia de la selección de un espesor de aislamiento adecuado para lograr mejoras económicas y ambientales.

Comparando ambos casos, nos encontramos con que la mejor solución económica del caso de estudio II es sólo un 0,25% mejor que la mejor económica del caso de estudio I. En ambos casos, la mejor

solución ambientales la misma. Por lo tanto concluimos que para el modelo estudiado, y teniendo en cuenta las condiciones climáticas de Lleida, la aplicación de los mismos espesores de aislamiento en las superficies externas es una buena estrategia.

Tabla 1: Presentación de los resultados del caso referente y los mejores resultados económicos y ambientales para ambos casos de estudio.

	Modelo del cubículo	Coste económico (€)	EI99 (Puntos)	Mejora(%)	
				Económica	EI99
	Caso base	11081	1416	0	0
Caso de estudio	Óptimo económico Todas las sup. 12cm PU	5948	803	46	43
	Óptimo ambiental Todas las sup. 29cm MW	6232	702	44	50

Los espesores de aislamientos óptimos obtenidos en el presente estudio no se encuentran cerca de los valores exigidos por las normativas actuales de eficiencia energética en edificios [15]. La ley requiere una transmitancia térmica de $0,60 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ para las fachadas exteriores en la ubicación de Lleida, pero nuestros resultados sugieren valores más bajos de entre $0,35$ y $0,26 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ para la mejor solución económica y $0,135 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ para lograr el mejor desempeño ambiental. Por lo que refiere al techo, se observa la misma situación, ya que la ley exige una transmitancia térmica de $0,40 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ y nuestro análisis sugiere valores de $0,285 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ para la mejor solución económica y de $0,135 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ para la solución con un mínimo impacto ambiental. Teniendo en cuenta los requisitos de la ley, los cubículos simulados tendrían un coste total y un impacto ambiental un 10% más elevado que la mejor solución económica encontrada en nuestro estudio (teniendo en cuenta el consumo de electricidad y el coste de los materiales). La solución con el mínimo impacto en nuestro estudio es también un 3% más barata y muestra un impacto un 23% menor que el cubículo construido de acuerdo con los requisitos de la ley española.

6. Conclusión

En el presente estudio se ha modelado un cubículo y se ha analizado su comportamiento térmico. Diferentes materiales de aislamiento se han considerado para las superficies externas y su grosor se ha modificado con el fin de encontrar las alternativas que optimicen al mismo tiempo el rendimiento económico y medioambiental de la construcción. Partiendo de un cubículo base sin aislamiento, hemos desarrollado dos casos de estudio, uno con espesor de aislamiento homogéneo y otro heterogéneo. La solución ambiental óptima se logra mediante el uso de MW con un espesor de 23 cm en todas las superficies, mientras que la óptima económica se obtiene mediante el uso de PU con un grosor de aislamiento de 8 cm en la fachada norte, 6 en la sur, 7 en la este y oeste y 9 en el techo.

El procedimiento desarrollado en el presente documento cuantifica el impacto ambiental de los materiales de construcción, junto con su coste económico, y a la vez cuantifica también el impacto ambiental y el coste de la electricidad consumida en climatización. A partir de los resultados llegamos a la conclusión de que para una correcta evaluación del impacto ambiental de un edificio, es necesario tener en cuenta el impacto ambiental de los materiales de construcción, junto con el impacto de la energía consumida.

Los resultados indican que, para nuestros casos de estudio, el cálculo del espesor óptimo de aislamiento es de suma importancia para reducir el coste económico y el impacto medioambiental. Los resultados indican mejoras alrededor de un 40% respecto al caso base. Además, la aplicación del mismo espesor de aislamiento para las diferentes superficies parece una buena estrategia, ya que la mejora alcanzada por diseños asimétricos con espesores distintos en cada superficie es marginal. Las soluciones óptimas identificadas por nuestro método muestran también mejoras económicas y medioambientales significativas en comparación con cubículos construidos con los requisitos de la legislación española.

7. Agradecimientos

Los autores quieren agradecer el soporte económico del Ministerio de Economía y Competitividad del gobierno español (DPI2012-37154-C02-02, CTQ2012-37039-C02) y del gobierno catalán por la acreditación de calidad de su grupo de investigación GREA (2014 SGR 123). La investigación ha recibido financiación del Séptimo Programa Marco de la Comisión Europea (FP / 2007-2013) en el acuerdo de subvención no. PIRSES-GA-2013-610692 (INNOSTORAGE).

8. Referencias

- [1] OMER, A.M. *Energy, environment and sustainable development*. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2008. vol. 12, no. 9, pp. 2265–2300. Cited By (since 1996):163
- [2] MENOUI, K. CASTELL, A. FARID, M.M. BOER, D. and CABEZA, L.F. *Life Cycle Assessment of experimental cubicles including {PCM} manufactured from natural resources (esters): A theoretical study*. Renewable Energy [en línea]. 2013. vol. 51, pp. 398–403. [Consulta 2 January 2014]. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148112006477>
- [3] SINGH, A. BERGHORN, G. JOSHI, S. and SYAL, M. *Review of life-cycle assessment applications in building construction*. Journal of Architectural Engineering. 2011. vol. 17, no. 1, pp. 15–23.
- [4] ORTIZ, O. CASTELLS, F. and SONNEMANN, G. *Sustainability in the construction industry: A review of recent developments based on LCA*. Construction and Building Materials. 2009. vol. 23, no. 1, pp. 28–39.
- [5] *JEPlus+EA, an EnergyPlus simulation manager for optimization studies*-<http://www.jeplus.org/> [Accessed: May 2014]. [en línea]. 2014. Disponible en: <http://www.jeplus.org/>
- [6] BRUNET, R. CORTÉS, D. GUILLÉN-GOSÁLBEZ, G. JIMÉNEZ, L. and BOER, D. *Minimization of the LCA impact of thermodynamic cycles using a combined simulation-optimization approach*. Applied Thermal Engineering [en línea]. 2012. vol. 48, pp. 367–377. [Consulta 20 January 2014]. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S135943111200275X>
- [7] *BEDEC Database* - <http://www.itec.es/nouBedec.e/bedec.aspx> [Accessed: May 2014]. . 2011.
- [8] GOBIERNO ESPAÑOL. *Boletín Oficial del Estado, Núm. 185, Sec. I. Pág. 56729, Orden IET/1491/2013, de 1 de agosto 2013 España*. . 2013.
- [9] KAYNAKLI, O. *A review of the economical and optimum thermal insulation thickness for building applications*. Renewable and Sustainable Energy Reviews [en línea]. 2012. vol. 16, no. 1, pp. 415–425. [Consulta 20 January 2014]. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032111004163>
- [10] *PRé Consultants. The Eco-indicator 99A damage oriented method for life cycle impact assessment. Methodology report and manual for designers*. Technical Report, PRé Consultants, Amersfoort, The Netherlands. 2000.
- [11] *The Ecoinvent Center. A competence centre of ETH; PSI; Empa & ART*. [en línea]. Disponible en: <http://www.ecoinvent.ch/>.
- [12] ANTIPOVA, E. BOER, D. CABEZA, L.F. GUILLÉN-GOSÁLBEZ, G. and JIMÉNEZ, L. *Uncovering relationships between environmental metrics in the multi-objective optimization of energy systems: A case study of a thermal solar Rankine reverse osmosis desalination plant*. Energy [en línea]. 2013. vol. 51, pp. 50–60. [Consulta 9 January 2014]. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544213000078>
- [13] CABEZA, L.F. CASTELL, A. MEDRANO, M. MARTORELL, I. PÉREZ, G. and FERNÁNDEZ, I. *Experimental study on the performance of insulation materials in Mediterranean construction*. Energy and Buildings [en línea]. 2010. vol. 42, no. 5, pp. 630–636. [Consulta 2 January 2014]. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778809002825>
- [14] *Residential Prototype Building Models. U.S. Department of Energy*. [en línea]. 2013. Disponible en: http://www.energycodes.gov/development/commercial/90.1_models
- [15] *Ministerio de Fomento, Government of Spain Actualización al Documento Básico DB-HE Ahorro de Energía del Código Técnico de la Edificación, Orden FOM/1635/2013 219* Ministerio de Fomento, Government of Spain (2013), pp. 67137–67209.