

02-006

Environmental and cost comparison of different insulation materials for the building's envelope to reduce energy demand

Marta Braulio-Gonzalo; M^a Dolores Bovea Edo

Universitat Jaume I;

Thermal insulation materials play an important role in the challenge of nearly zero-energy buildings due to their potential in reducing building's energy demand and carbon emissions. However, increasing the insulation material thickness in the building's envelope has implications both from the energy, environmental and economic point of view.

This study presents a comparison among different insulation material for the building's envelope (roof, façade and floor) to achieve energy demand reductions during the operation phase of the building. To do so, the Life Cycle Assessment and the Life Cycle Costing methodologies are applied to eleven alternative insulation materials, both conventional and those emerging based on natural products, and six energy efficiency scenarios. As a case study, a detached single-family house located on the east coast of Spain has been selected. The results reveal that sheep wool and recycled cotton, jointly with the traditionally-used mineral and glass wool, are the most eco-efficient alternatives.

Keywords: eco-efficiency; life cycle assessment; life cycle cost; energy demand; insulation material

Comparación ambiental-económica de materiales de aislamiento térmico para la envolvente del edificio a fin de reducir la demanda energética

Los materiales de aislamiento térmico juegan un papel importante en diseño de los edificios de energía casi nula debido a su gran potencial en la reducción de la demanda energética del edificio y las emisiones de efecto invernadero. Sin embargo, el aumento del espesor del material aislante en la envolvente del edificio tiene implicaciones energéticas, ambientales y económicas.

En este contexto, este estudio presenta una comparación entre diferentes materiales de aislamiento térmico de la envolvente del edificio (cubierta, fachada y suelo) con el fin de reducir la demanda energética durante la fase de uso del mismo. Para ello, se aplican las metodologías de Análisis de Ciclo de Vida y Coste de Ciclo de Vida a once materiales aislantes alternativos, tanto convencionales como emergentes basados en productos naturales en seis escenarios de reducción de la demanda energética. Como caso de estudio, se ha seleccionado una vivienda unifamiliar aislada ubicada en la costa este de España. Los resultados revelan que la lana de oveja y el algodón reciclado, conjuntamente con la lana mineral y de vidrio tradicionalmente utilizadas, son las alternativas más eco-eficientes.

Palabras clave: eco-eficiencia; análisis de ciclo de vida; coste de ciclo de vida; demanda energética; aislamiento térmico

Correspondencia: M^a Dolores Bovea Edo bovea@uji.es



Este obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 4.0 Internacional. <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

1. Introducción

Con la introducción del concepto de edificios de consumo de energía casi nulo, la Directiva 2010/31/UE de eficiencia energética en los edificios insta a los diseñadores a incluir materiales de aislamiento térmico en la envolvente de los edificios, con el fin de reducir el consumo energético durante su etapa de uso.

El consumo de energía en la fase de uso del edificio disminuye con el incremento de espesor del aislamiento térmico en su envolvente. Sin embargo, ello conlleva el uso de una mayor cantidad de material, por lo que el coste ambiental y económico del mismo también se ve incrementado. Por lo tanto, es necesario analizar cuál es el espesor óptimo que permite equilibrar los criterios energéticos, de coste y ambientales (Özel *et al.*, 2015; Ashouri *et al.*, 2016).

Los materiales de aislamiento térmico más utilizados en el sector de la construcción han sido ampliamente analizados en la literatura desde diferentes puntos de vista. A modo de ejemplo, Audenaert, De Cleyn (2012) y Buyle Su *et al.* (2016) se centran en analizar el comportamiento ambiental de diferentes materiales aislantes, mientras que Özel *et al.* (2015), Ashouri *et al.* (2016) y Dylewski y Adamczyk (2016) incorporan, además, el aspecto económico. Sin embargo, y de acuerdo con las conclusiones de Barrau, Ibañez y Badia (2014), el espesor de aislamiento óptimo difiere de forma significativa dependiendo del criterio con el que se calcule. Además, el tipo de material (proceso de fabricación y propiedades térmicas) y las condiciones del lugar donde se instala (por ejemplo, la zona climática) también afectan fuertemente la determinación de los espesores óptimos (Barrau, Ibañez y Badia, 2014; Schiavoni *et al.*, 2016).

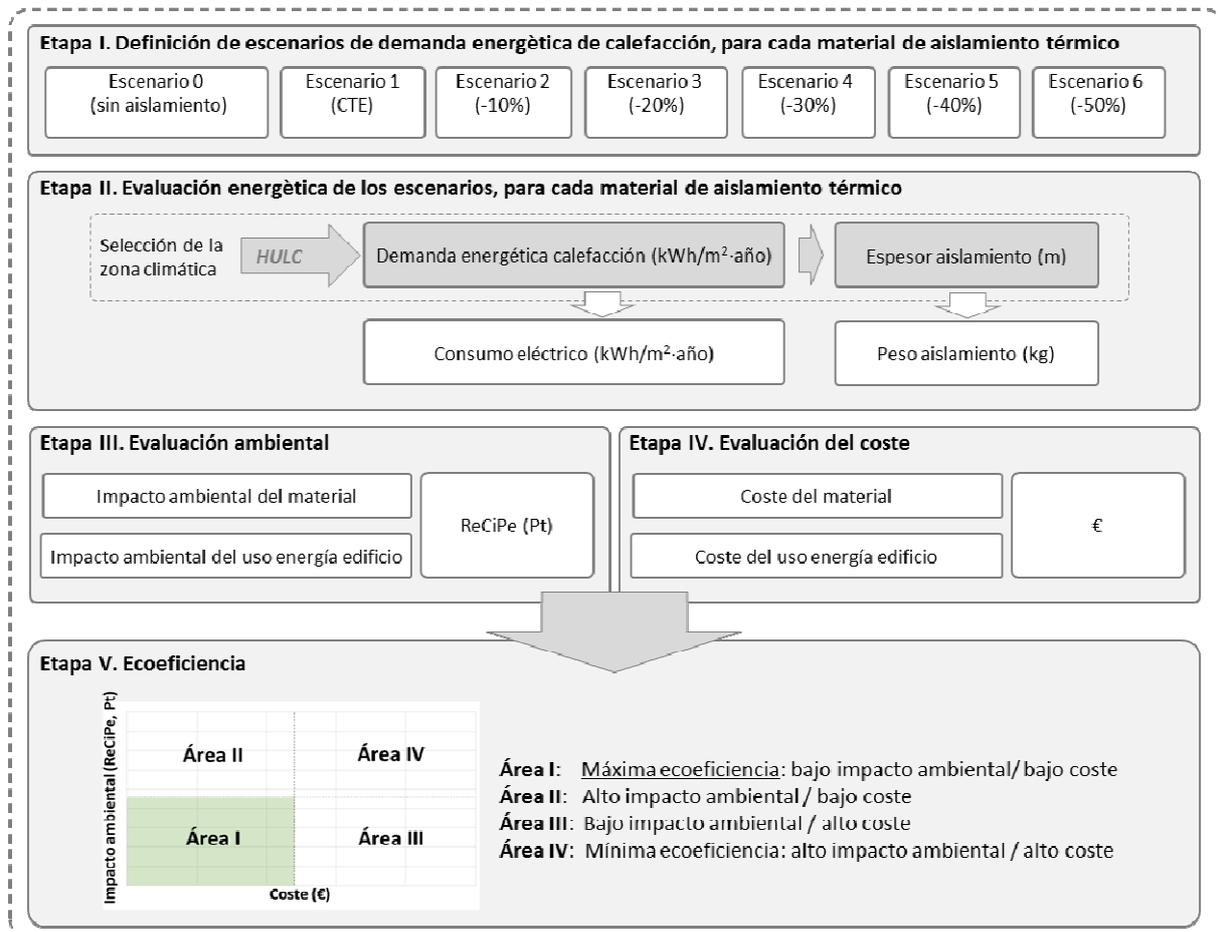
En este contexto, esta comunicación presenta una metodología que permite identificar, desde el punto de vista ambiental y económico, el espesor óptimo de un material de aislamiento térmico para ser incorporado en la envolvente de un edificio, con el fin de conseguir reducciones en la demanda energética de calefacción durante su uso. Como caso de aplicación, esta metodología se aplica a una vivienda unifamiliar, sobre la que se comparan seis escenarios diferentes de demanda energética, para once alternativas de materiales de aislamiento térmico, tanto convencionales como emergentes derivados de productos naturales.

2. Metodología

La Figura 1 muestra la metodología que se propone con el fin de seleccionar el espesor de aislamiento térmico óptimo a instalar en la envolvente de un edificio (cubierta, fachada y suelo), dependiendo de la reducción requerida de la demanda energética y del tipo de material. Para ello, se considera como criterios de selección, de forma simultánea, el aspecto ambiental y el económico mediante el estudio de la ecoeficiencia (Ibañez-Forés, Bovea y Azapagic, 2013) de cada alternativa. Los aspectos ambiental y económico se analizan mediante la aplicación de las metodologías de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) (ISO 14040, 2006) y Coste de Ciclo de Vida (CCV) (Davis Langdon Management Consulting, 2007), respectivamente.

Para realizar el estudio, se han seleccionado once materiales de aislamiento térmico, clasificados en dos grupos: convencionales (fibra de vidrio, FV, lana mineral, LM, poliestireno expandido, EPS, poliestireno extrusionado, XPS, poliuretano, PUR, vidrio celular, VC, y corcho, C) y aquéllos derivados de productos naturales reciclados (lana de oveja, LO, y algodón reciclado, AR, ambos en formato relleno y en manta).

Figura 1: Esquema metodológico



En la **Etapa I** se definen escenarios alternativos de demanda energética de calefacción (kWh/m²-año) del edificio. El escenario 0 considera la envolvente del edificio sin aislamiento térmico; el Escenario 1 establece el espesor mínimo de aislamiento necesario para cumplir con la normativa en materia de eficiencia energética en los edificios, CTE DB HE1 (2013). A continuación, sucesivos escenarios pueden establecerse como una reducción progresiva de la demanda energética del edificio con respecto al valor exigido por el CTE (2013).

En la **Etapa II** se determina la resistencia térmica (R , m²·K/W) de los materiales de aislamiento necesaria para alcanzar cada uno de los escenarios, según su conductividad térmica (λ , W/m·K) y su espesor (m). Así, la R se consigue aumentando el espesor de aislamiento térmico, que queda condicionado por la λ de cada material. El espesor de material necesario se traduce en peso (kg), que será la unidad funcional sobre la que se evalúa el impacto ambiental y el económico. La demanda energética se calcula mediante la herramienta HULC (Universidad de Sevilla, 2013), que a su vez permite calcular el consumo de energía primaria (kWh/m²-año) durante la fase de uso del edificio.

En las **Etapas III y IV**, se calcula el impacto ambiental y económico de cada escenario, para cada material de aislamiento, respectivamente. Para la obtención de los indicadores ambientales, se ha completado un inventario del ciclo de vida de cada escenario, para cada material de aislamiento, a partir de datos primarios combinados con datos de la base de datos comercial Ecoinvent (*Ecoinvent Database 3.1*, 2014), y se ha utilizado el método

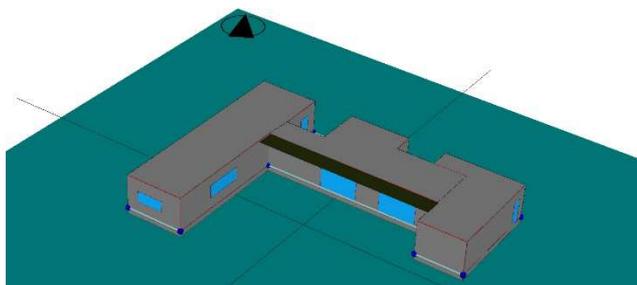
ReCiPe como método de evaluación del impacto (Goedkoop *et al.*, 2008), todo ello, modelado en SimaPro 8.3.2 (Prè Consultants, 2016). Para la obtención de los indicadores económicos, se ha utilizado el coste unitario de cada elemento de cada escenario, combinando precios (en euros) obtenidos directamente de fabricantes y de la base de datos de precios de Instituto Valenciano de la Edificación (2016). En ambos casos, se considera una vida útil del edificio de 50 años (Barrau, Ibañez y Badia, 2014; Sierra-Pérez, Boschmonart-Rives y Gabarrell, 2016).

Finalmente, en la **Etapa V** se analiza la ecoeficiencia (ISO 14045, 2012) de cada escenario, para cada material de aislamiento, mediante un diagrama de doble entrada (impacto ambiental vs. coste económico), donde se identifican los mejores materiales de aislamiento, para cada escenario, como aquéllos con un menor impacto ambiental y menor coste económico (ver Área I en la Figura 1).

3. Descripción del caso de estudio

La metodología descrita se aplica a una vivienda unifamiliar aislada, como caso de estudio. El edificio se encuentra situado en la costa este de España, a una latitud norte de 39° 59' 11" y a una longitud este de 0° 2' 12", lo que se corresponde con la zona climática B3 según CTE (2013), y consta de una superficie construida de 278.40 m² distribuida en una planta. La geometría del edificio en 3D se muestra en la Figura 2.

Figura 2: Modelado 3D del caso de estudio



La cubierta del edificio es invertida no transitable y tiene un valor de resistencia térmica R de 0,943 m²·K/W. La fachada se trata de un cerramiento de doble hoja, cuya hoja principal es de ladrillo cerámico y el trasdosado interior de paneles de catón-yeso, con una R total de 1,265 m²·K/W. El suelo de la vivienda está ejecutado mediante un forjado sanitario elevado respecto del terreno y ventilado a través de una cámara de aire, cuya R total es de 0,487 m²·K/W. Los valores indicados de R excluyen la resistencia térmica del material de aislamiento, puesto que este dato representa una variable del estudio. La vivienda consta de un sistema de agua caliente sanitaria, así como de un sistema de climatización para calefacción y refrigeración, ambos abastecidos por energía eléctrica.

4. Resultados

A continuación se presentan los resultados que se obtienen de aplicar la metodología descrita en el apartado 2, al caso de estudio descrito en el apartado 3, para los materiales de aislamiento térmico: FV, LM, EPS, XPS, PUR, VC, C, LO (relleno y en manta) y AR (relleno y en manta).

Etapa I. Se han definido siete escenarios de demanda energética, según muestra la Tabla 1. El escenario 0 considera la envolvente del edificio sin aislamiento térmico; el Escenario 1

establece el espesor mínimo de aislamiento necesario para cumplir con la normativa en materia de eficiencia energética en los edificios en España, CTE DB HE1 (2013). A continuación, sucesivos escenarios (del 2 al 6) establecen una reducción progresiva del 10% en la demanda energética del edificio con respecto a CTE (2013).

Tabla 1. Descripción de los escenarios de demanda energética

Escenario de demanda energética	Demanda energética de calefacción	kWh/m ² .año
Escenario 0	Sin aislamiento	
Escenario 1	Mínimo espesor, según CTE (2013)	15,00
Escenario 2	Reducción del 10% respecto a CTE	13,50
Escenario 3	Reducción del 20% respecto a CTE	12,00
Escenario 4	Reducción del 30% respecto a CTE	10,50
Escenario 5	Reducción del 40% respecto a CTE	9,00
Escenario 6	Reducción del 50% respecto a CTE	7,50

Etapa II. Las simulaciones realizadas con HULC (Universidad de Sevilla, 2013) permiten calcular los valores de R requeridos para cada elemento de la envolvente (techo, fachada y suelo) para satisfacer los requerimientos de demanda energética de calefacción de cada uno de los escenarios, y para cada tipo de material de aislamiento. Para obtener la cantidad de material de aislamiento se considera como unidad funcional la cantidad (kg) necesaria para proporcionar la R requerida en cada uno de los escenarios, para 50 años de vida útil del edificio. Así, según las R, se obtiene el espesor de material en función de su λ . Seguidamente, los cálculos de demanda energética y de consumo de energía primaria, obtenidos de las simulaciones, se traducen para una vida útil del edificio de 50 años, resultados que se presentan en la Tabla 2.

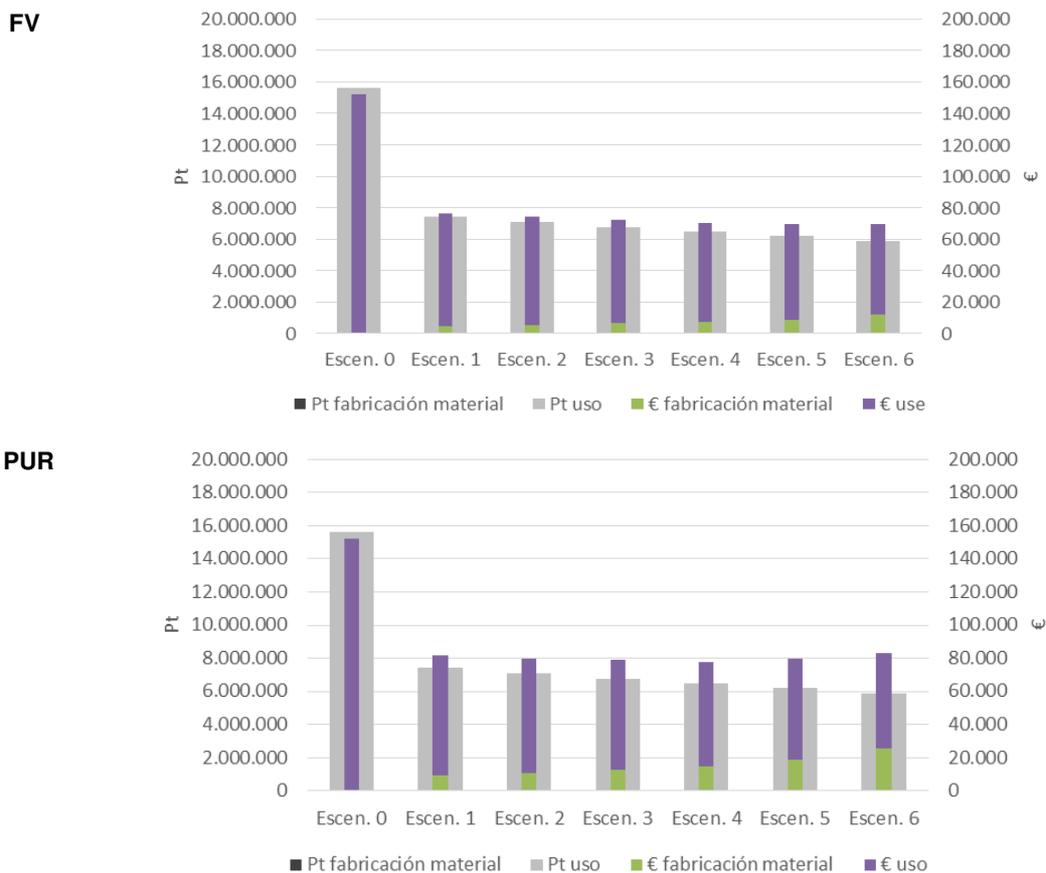
Tabla 2. Demanda energética de calefacción y consumo de energía primaria durante la vida útil del edificio (50 años)

Escenario	Demanda energética		Consumo de energía primaria	
	MWh (50 años)	Reducción	MWh (50 años)	Reducción
Escenario 0	716,32	-	1.288,71	-
Escenario 1	208,80	0,00%	610,39	0,00%
Escenario 2	187,92	-10,00%	582,83	-4,52%
Escenario 3	167,04	-20,00%	559,17	-8,39%
Escenario 4	146,16	-30,00%	533,69	-12,57%
Escenario 5	125,28	-40,00%	511,56	-16,19%
Escenario 6	104,40	-50,00%	485,25	-20,50%

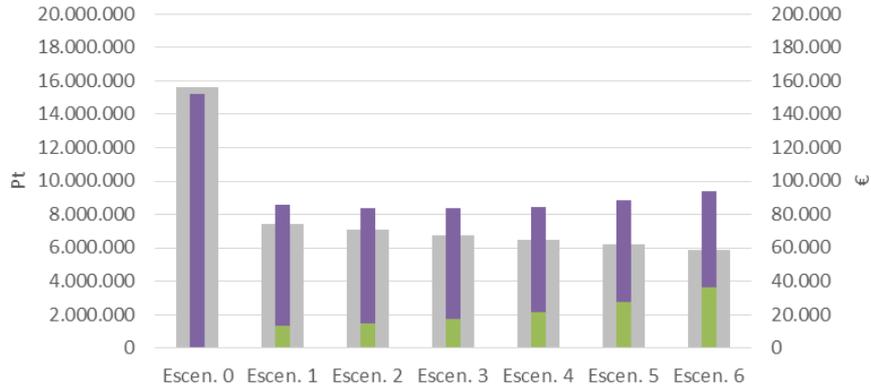
Etapa III y IV. Considerando el impacto ambiental y el coste por unidad de superficie de envolvente, se evalúan ambos impactos para el conjunto global del edificio, según se muestra en la Figura 3 aplicando el método de evaluación del impacto ReCiPe (Goedkoop *et al.*, 2008). El eje izquierdo presenta la contribución ambiental (Pt) mientras que el eje derecho muestra la contribución económica (€), en ambos casos tanto para la fase de

fabricación del material como para la fase de puesta en uso. Como se observa en dicha figura, el escenario 0 sólo presenta impacto ambiental y económico durante la fase de uso del edificio, puesto que en dicho supuesto la envolvente carece de aislamiento térmico. Así, el impacto resulta más del doble que en el escenario 1, en el que la envolvente ya cuenta con el espesor mínimo de aislamiento para cumplir con el CTE. Ello confirma la importancia de incorporar aislamiento térmico en la envolvente de los edificios. Además, se observa que la fase de fabricación del material es prácticamente inapreciable comparada con la fase de uso. En todos los materiales se puede observar que a medida que el escenario de demanda energética es más restrictivo, existe un incremento en el impacto ambiental del material y en su coste, ya que la cantidad de material a utilizar es mayor. Sin embargo, el impacto durante la fase de uso decrece, ya que el uso de la energía es menor. Así, existe un punto de inflexión entre el aspecto económico y el ambiental, para el cual el coste económico de la fabricación del material se incrementa de tal forma que el coste global (etapas de fabricación y uso) no compensa la reducción del impacto ambiental. Este punto determinará el espesor óptimo de cada uno de los materiales estudiados.

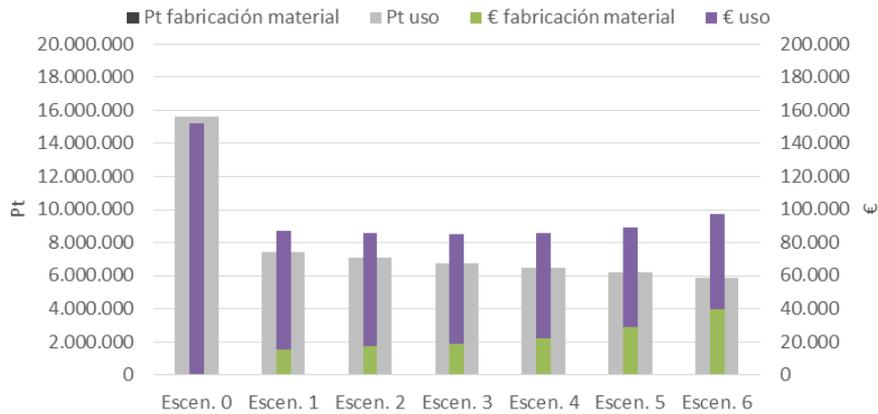
Figura 3: Impacto económico (€) y ambiental (ReCiPe, Pt) por tipo de material de aislamiento y por escenario



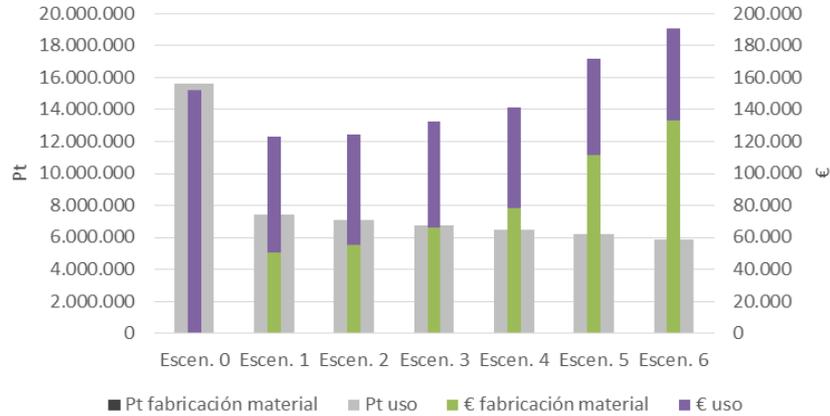
EPS



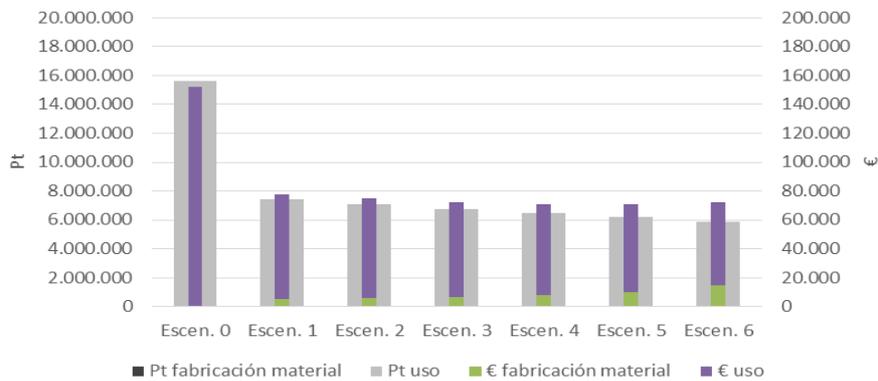
XPS



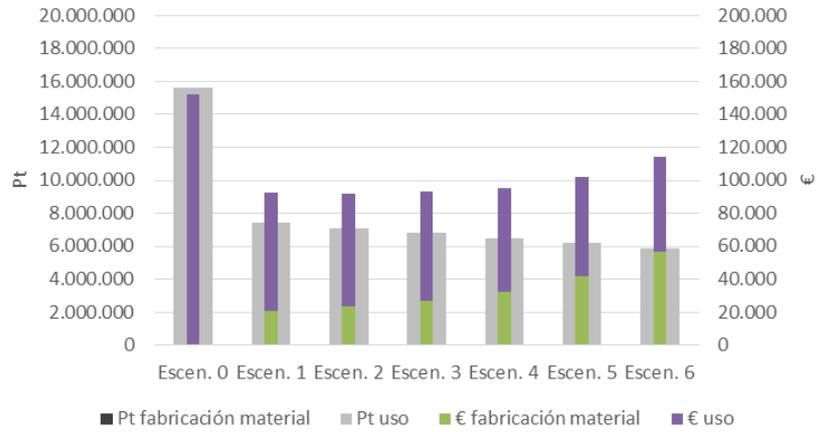
VC



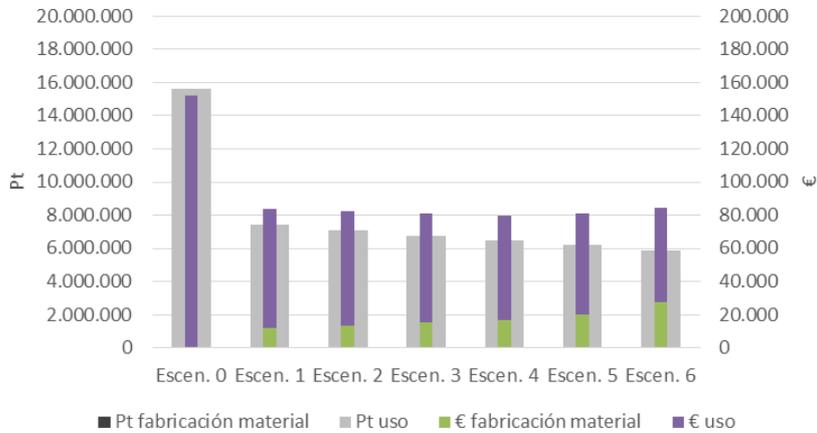
LM



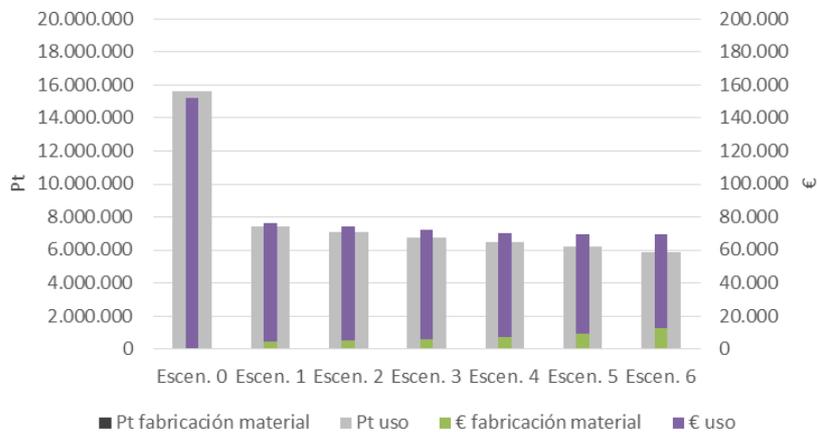
C



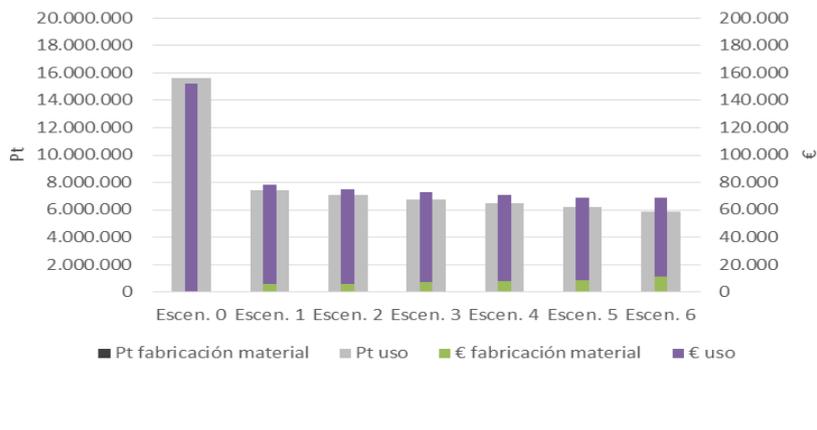
LO (en manta)

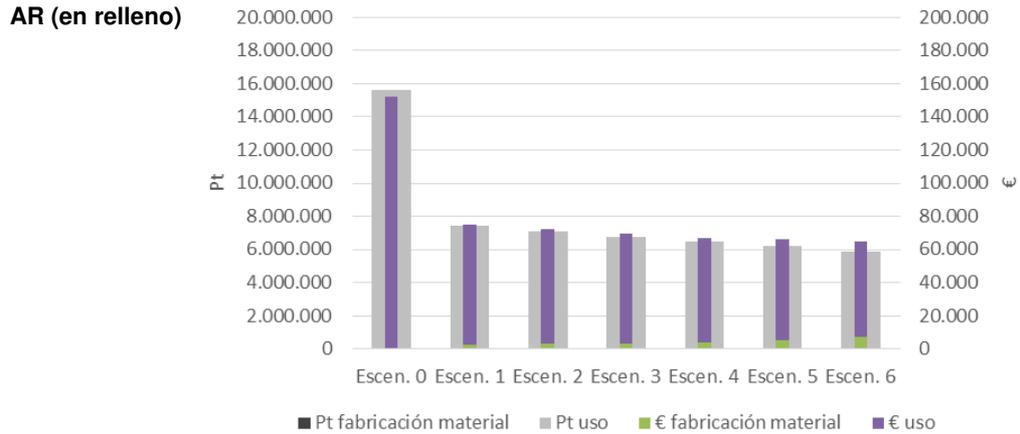


LO (en relleno)



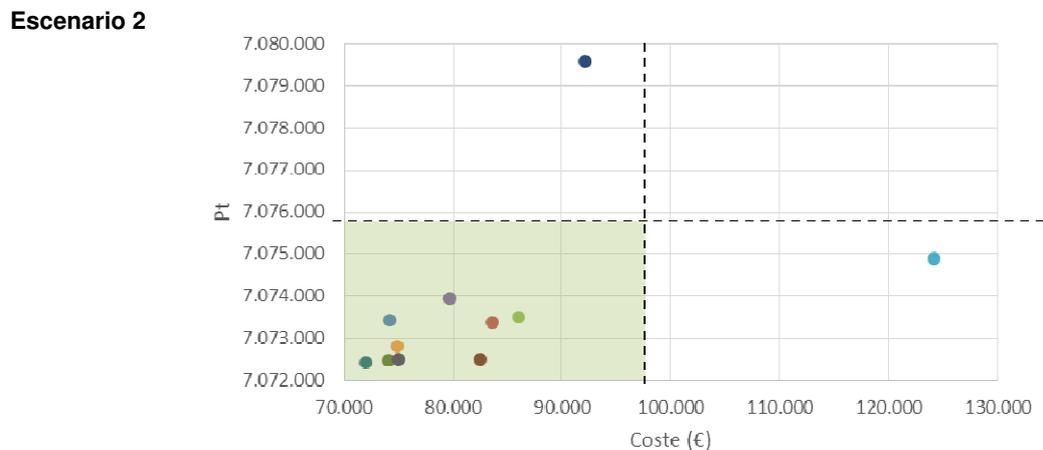
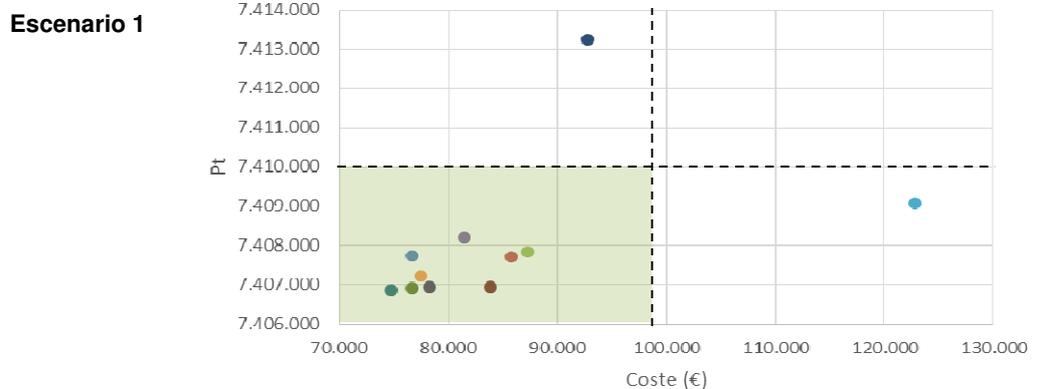
AR (en manta)



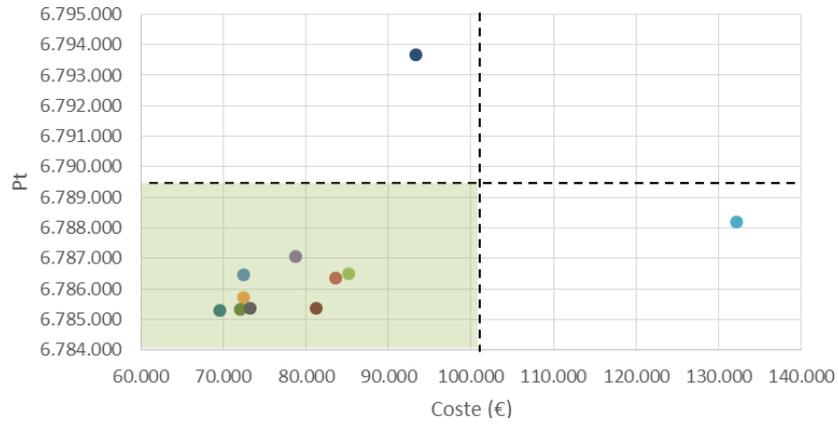


Etapa V. Finalmente, los resultados obtenidos del análisis ambiental y económico, se analizan mediante un diagrama de ecoeficiencia (Ibáñez-Forés, Bovea y Azapagic, 2013), en el que se combinan ambos aspectos para cada escenario y para cada material. El impacto ambiental total es la suma del impacto de la etapa de fabricación del material y de la etapa de uso del edificio. De la misma forma, el coste total es la suma del coste de la fabricación del material y de la etapa de uso. Como se observa en la Figura 4, la FV, EPS, XPS, PUR, LM, LO y AR se sitúan en el área I del diagrama, de manera que se muestran como los materiales más ecoeficientes. El C se engloba en el área II y el VC en el área III.

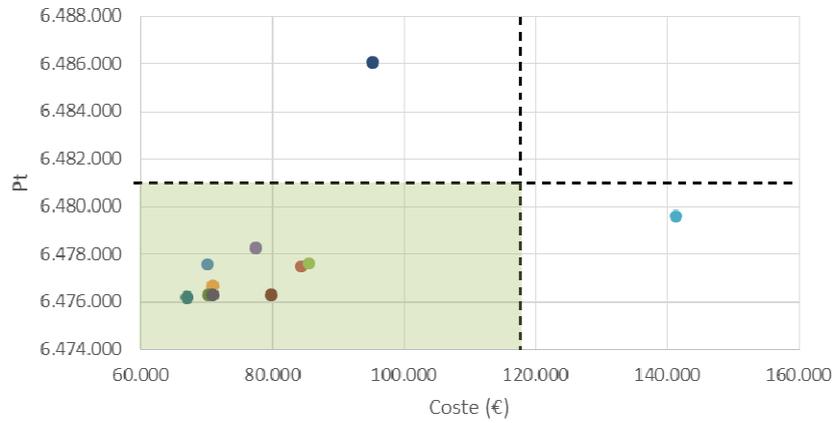
Figura 4: Ecoeficiencia: impacto ambiental (Pt, ReCiPe) vs. impacto económico (€)



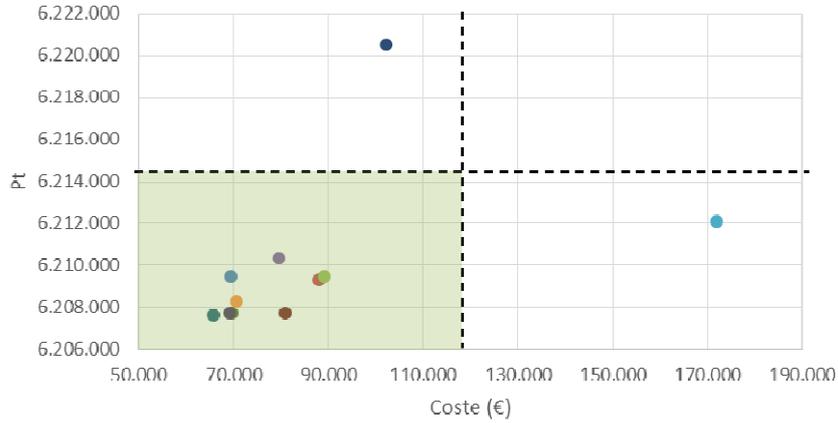
Escenario 3



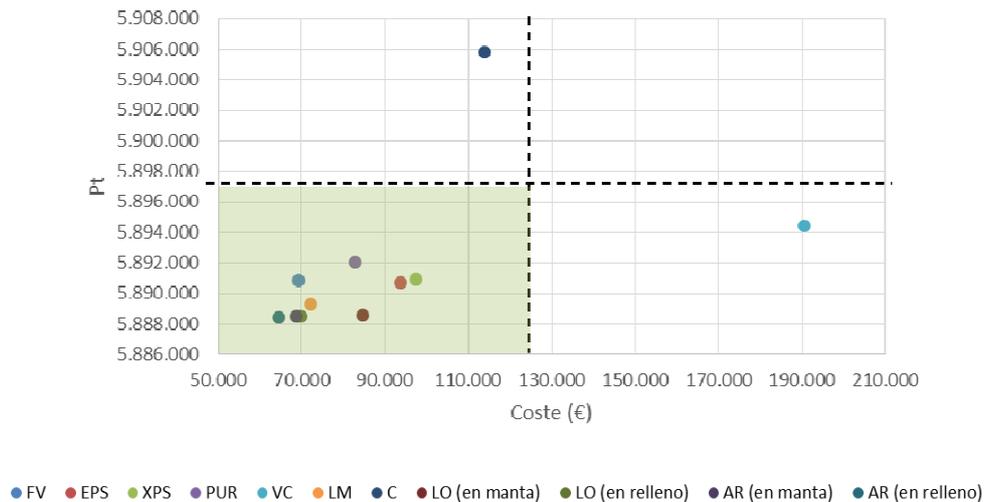
Escenario 4



Escenario 5



Escenario 6



5. Discusión y conclusiones

A partir de los resultados obtenidos, se puede afirmar que, en general, el escenario óptimo es el 4, que implica una reducción de la demanda energética de calefacción del 30% en comparación con la requerida por el CTE. Esto ocurre para los materiales de aislamiento EPS, XPS, PUR y LO en la forma de manta. Una reducción del 40% es óptima para LM y LO en forma de relleno, mientras que una reducción del 50% es más apropiada sólo para FV y AR, tanto en las formas de relleno y manta.

VC y C resultan los materiales menos ecoeficientes y quedan restringidos sólo a los escenarios 1 y 2, respectivamente. Por lo tanto, los resultados revelan que un aumento ilimitado del grosor del aislamiento no implica una mejor ecoeficiencia en todos los tipos de materiales debido al factor de coste. Por lo tanto, no es recomendable utilizar estos materiales de aislamiento de forma generalizada en la envoltura de un edificio, sino que de forma ocasional, como por ejemplo en puentes térmicos y ciertos puntos críticos de la envoltura térmica con problemas de condensación (facilitados por el μ alto de FG).

El escenario óptimo de eficiencia energética ayuda a estimar el espesor óptimo que debe emplearse para cada material aislante, tal y como muestra la Tabla 3.

Tabla 3. Escenario óptimo para cada material de aislamiento

		Escenario óptimo						Espesor óptimo (m)		
		Escenario 1 (CTE)	Escenario 2 (-10%)	Escenario 3 (-20%)	Escenario 4 (-30%)	Escenario 5 (-40%)	Escenario 6 (-50%)	Cubierta	Fachada	Suelo
Convencional	FV						•	0,27	0,31	0,11
	EPS				•			0,15	0,14	0,05
	XPS				•			0,16	0,14	0,05
	PUR				•			0,14	0,13	0,05
	VC	•						0,12	0,08	0,06
Natural	LM					•		0,19	0,19	0,08
	C		•					0,13	0,10	0,06
	LO en manta			•				0,20	0,20	0,10
	LO en relleno				•			0,23	0,24	0,09
	AR en manta						•	0,25	0,30	0,10
	AR en relleno						•	0,30	0,35	0,12

Como conclusión se puede destacar que este estudio presenta una metodología general de evaluación del impacto ambiental, económico y ecoeficiencia de diferentes materiales aislantes aplicables en la edificación. De su aplicación a la comparativa de 11 materiales, tanto convencionales como emergentes, puede concluirse que la industria de la construcción debe promover el uso de materiales aislantes naturales como lana de oveja y algodón reciclado, junto con la lana mineral y de vidrio tradicionalmente utilizada, ya que presentan elevada ecoeficiencia. Estos hallazgos pueden ser de ayuda para diferentes agentes implicados en el sector de la edificación, arquitectos, ingenieros de construcción, empresas de fabricación de materiales aislantes, y legisladores, en la difícil tarea de alcanzar el objetivo de construir edificios de consumo de energía casi nulo.

Referencias

- Ashouri, M., Astarai, F. R., Ghasempour, R., Ahmadi, M. H. & Feidt, M. (2016). Optimum insulation thickness determination of a building wall using exergetic life cycle assessment. *Applied Thermal Engineering*, 106, 307-315. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.05.190.
- Audenaert, A., De Cleyn, S. H. & Buyle, M. (2012). LCA of low-energy flats using the Eco-indicator 99 method: Impact of insulation materials. *Energy and Buildings*, 47, 68-73. doi: 10.1016/j.enbuild.2011.11.028.
- Barrau, J., Ibañez, M. & Badia, F. (2014). Impact of the optimization criteria on the determination of the insulation thickness. *Energy and Buildings*, 76, 459-469. doi: 10.1016/j.enbuild.2014.03.017.

- CTE DB HE1 (2013) Orden FOM/1635/2013, de 10 de septiembre, por la que se actualiza el Documento Básico DB-HE Ahorro de Energía del Código Técnico de la Edificación, aprobado por Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo.
- Davis Langdon Management Consulting (2007) Life Cycle Costing (LCC) As a Contribution to Sustainable Construction: a Common Methodology. Guidance on the Use of the LCC Methodology and its Application in Public Procurement
- Directiva 2010/31/UE del Parlamento Europeo y del Consejo de 19 de mayo de 2010 relativa a la eficiencia energética de los edificios Unión Europea.
- Dylewski, R. & Adamczyk, J. (2016). Study on ecological cost-effectiveness for the thermal insulation of building external vertical walls in Poland. *Journal of Cleaner Production*, 133, 467-478. doi: 10.1016/j.jclepro.2016.05.155.
- Ecoinvent Database 3.1 (2014). Disponible en: <http://www.ecoinvent.org/> (Accedido: 10 de enero de 2017).
- Goedkoop, M. J., Heijungs, R., Huijbregts, M., Schryver, A. De, Struijs, J. & Zelm, R. Van (2008) ReCiPe. A Life Cycle Impact Assessment Method Which Comprises Harmonised Category Indicators At the Midpoint and the Endpoint Level; First edition Report I: Characterisation. Disponible en: <http://www.lcia-recipe.net>.
- Ibáñez-Forés, V., Bovea, M. D. & Azapagic, A. (2013). Assessing the sustainability of Best Available Techniques (BAT): Methodology and application in the ceramic tiles industry. *Journal of Cleaner Production*, 51, 162-176. doi: 10.1016/j.jclepro.2013.01.020.
- Instituto Valenciano de la Edificación (2016) Base de Datos de Construcción de la Comunitat Valenciana. Valencia. Disponible en: <http://www.five.es/basedatos/Visualizador/Base16/index.htm>.
- ISO 14040 (2006) Environmental management - Life Cycle Assessment - Principles and Framework.
- ISO 14045 (2012) Environmental Management - Eco-Efficiency Assessment of Product Systems - Principles, Requirements and Guidelines.
- Özel, G., Açikkalp, E., Görgün, B., Yalık, H. & Caner, N. (2015). Optimum insulation thickness determination using the environmental and life cycle cost analyses based entransy approach. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 11, 87-91. doi: 10.1016/j.seta.2015.06.004.
- Prè Consultants (2016) SimaPro Database 8.3.2.
- Schiavoni, S., Alessandro, F. D., Bianchi, F. & Asdrubali, F. (2016). Insulation materials for the building sector : A review and comparative analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 988-1011. doi: 10.1016/j.rser.2016.05.045.
- Sierra-Pérez, J., Boschmonart-Rives, J. & Gabarrell, X. (2016). Environmental assessment of façade-building systems and thermal insulation materials for different climatic conditions. *Journal of Cleaner Production*, 113, 102-113. doi: 10.1016/j.jclepro.2015.11.090.
- Su, X., Luo, Z., Li, Y. & Huang, C. (2016). Life cycle inventory comparison of different building insulation materials and uncertainty analysis. *Journal of Cleaner Production*, 112, 275-281. doi: 10.1016/j.jclepro.2015.08.113.
- Universidad de Sevilla (2013). HULC Herramienta Unificada LIDER-CALENER. Madrid: Ministerio de Fomento