

05-026

IMPACT OF HIGH-PERFORMANCE INSULATION ON INDOOR ENERGY RENOVATION OF BUILDINGS

Cerezo Narváez, Alberto ⁽¹⁾; Guerrero Delgado, María del Carmen ⁽²⁾; Monge Palma, Rafael Antonio ⁽²⁾; Sánchez Ramos, José ⁽²⁾; Álvarez Domínguez, Servando ⁽²⁾

⁽¹⁾ Universidad de Cádiz, ⁽²⁾ Universidad de Sevilla

Energy rehabilitation of buildings is an important strategy in the European Union ecological transition. These interventions can be approached from the concept of the energy triangle: reducing energy demand by improving the thermal envelope, modifying heating/cooling equipment and/or incorporating renewable energies. However, retrofitting the envelope is not sufficiently considered because it does not achieve as brilliant results in terms of return on investment as the renovation of facilities, with usually shorter payback periods. Moreover, despite its advantages, façade renovation on the exterior may not be an option in cases where some urban planning parameters are exhausted or in the case of an intervention on a unique or listed building. In this context, this work quantifies the competitive advantage of using a high-performance insulating material compared to a traditional solution, quantifying it in terms of energy and/or economic savings, at the same thickness (reducing demand) and thermal resistance (increasing the useful surface area). The results show that, in a multi-family building of average compactness in Seville, between 1 and 7% of the surface area can be conserved or heating demand can be reduced by between 8 and 17%.

Keywords: energy rehabilitation; thermal insulation; interior façade renovation; useful surface area; energy demand

IMPACTO DE UN AISLAMIENTO DE ALTAS PRESTACIONES EN LA REHABILITACIÓN ENERGÉTICA INTERIOR DE EDIFICIOS

La rehabilitación energética edificatoria es una estrategia importante en la transición ecológica de la Unión Europea. Estas intervenciones pueden abordarse desde el concepto del triángulo energético: reducir la demanda energética mejorando la envolvente térmica, modificar los equipos de frío/calor e/o incorporar energías renovables. No obstante, la rehabilitación de la envolvente no es considerada suficientemente porque no obtiene unos resultados tan brillantes en el retorno de la inversión como la renovación de las instalaciones, con unas amortizaciones habitualmente más cortas. Además, a pesar de sus ventajas, la renovación de la fachada por el exterior puede no ser una opción en caso de que algunos parámetros urbanísticos estén agotados o se trate de una intervención en un edificio de carácter singular o protegido. En este contexto, este trabajo cuantifica la ventaja competitiva de utilizar un aislante de altas prestaciones frente a una solución tradicional, cuantificándola en ahorro energético y/o económico, a igualdad de espesor (reduciendo la demanda) y de resistencia térmica (aumentando la superficie útil). Los resultados muestran que, en un bloque de compacidad media en Sevilla, puede llegar a conservarse entre un 1 y un 7% de la superficie o reducirse la demanda de calefacción entre un 8 y un 17%.

Palabras clave: rehabilitación energética; aislamiento térmico; renovación interior de fachada; superficie útil; demanda energética

Agradecimientos: Al proyecto "LADERA: Large-scale Assessment of plus-energy Districts through Escalation and Replicability in Andalusia" (US-1380863) y al proyecto "MedEcoSuRe - Mediterranean University as Catalyst for Eco-Sustainable Renovation" (A_B.4.3_0218).



© 2023 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. Introducción

La rehabilitación energética de los edificios es una estrategia importante en la transición ecológica de la Unión Europea, recogida en el Pacto Verde europeo (Rando Burgos, 2021). Esto se refleja en una de sus ocho líneas de actuación, dirigida al uso eficiente de la energía y recursos en la construcción y renovación de edificios. En el contexto de España, la rehabilitación de edificios tiene como objetivo, según la Ley 8/2013 de rehabilitación, regeneración y renovación urbanas, generar bienestar económico y social, garantizando la calidad de vida a sus habitantes (Lizundia et al., 2018). Para lograrlo, se han de llevar a cabo intervenciones de rehabilitación y de regeneración, así como de renovación urbana. Esta renovación puede abordarse desde el concepto del triángulo energético que muestra la Figura 1. En primer lugar, reducir la demanda energética del edificio mediante la mejora de la envolvente térmica (Bastante-Ceca et al., 2019). A continuación, diseñar, modificar y/u optimizar los equipos de frío y calor (Guerrero Delgado et al., 2022). Finalmente, incorporar energías renovables, en la medida que sea necesario seguir aportando energía al edificio (Cerezo-Narváez, Bastante-Ceca, et al., 2021).

Figura 1. Triángulo de la energía



No obstante, la rehabilitación de la envolvente no ha sido considerada suficientemente en España, porque no suele obtener unos resultados tan brillantes en el retorno de la inversión como la renovación de las instalaciones existentes, con unos periodos de amortización habitualmente más cortos (Cerezo-Narváez, Piñero-Vilela, et al., 2021). Sin embargo, el primer paso para lograr una eficiencia energética eficaz consiste en, como indica el Código Técnico de Edificación (CTE), reducir la demanda (Sánchez Ramos et al., 2019). Si el edificio requiriese de poca energía para ser calentado o enfriado, la climatización a instalar sería más sencilla y de menor potencia y, por tanto, más económica y rentable (Barbadilla-Martín et al., 2018). Por ello, una de las estrategias más efectivas y energéticamente necesarias, es obtener una envolvente que cumpla las cada vez más restrictivas normativas energéticas, para satisfacer los requisitos actuales de confort y satisfacción de sus ocupantes (Acar et al., 2021). Además, aunque rehabilitar energéticamente la cubierta o los huecos de fachada suele ser relativamente sencillo, la superficie afectada suele no ser significativa. Por ello, actuar en la parte opaca de la fachada es una ventaja que asegura una mayor reducción de la demanda energética (Goia et al., 2013).

La renovación de la fachada puede realizarse desde el exterior o desde el interior. A priori, sin condicionantes urbanísticos, arquitectónicos o constructivos, aislar la fachada desde el exterior es una de las mejores opciones (Dickson & Pavía, 2021), ya que reviste homogéneamente toda la fachada, evitando discontinuidades en la protección térmica (puentes térmicos). Durante la intervención, las obras se ejecutan con una mínima interferencia para los usuarios del edificio, al no hacer falta trabajar por el interior de los edificios. No obstante, suelen requerir la colocación de andamios, incrementando el coste de reparación de las fachadas, y perjudicando el tránsito exterior (al ocupar la vía pública). Además, la rehabilitación por el exterior afectará a la totalidad del inmueble, por lo que se requiere de una intervención unitaria y consensuada entre las partes interesadas. Existen dos tipologías de intervención por el exterior claramente destacadas (Alonso et al., 2016): la fachada ventilada y el sistema de aislamiento térmico por el exterior (SATE).

Sin embargo, a pesar de sus ventajas, la renovación de la fachada por el exterior puede no ser una opción en caso de que algunos parámetros urbanísticos estén agotados o se trate de una intervención en un edificio de carácter singular o protegido. A nivel urbanístico, intervenir por el exterior supone incrementar la edificabilidad de la edificación, aumentar la ocupación, reducir la separación a linderos (frontales, laterales o traseros) y/o invadir medianerías colindantes. Por tanto, al intervenir por el exterior, se aumenta tanto la cantidad de techo edificable como la superficie ocupada por la edificación, así como se reduce la distancia de esta a sus linderos, por lo que, en caso de que esté agotado alguno de estos parámetros, esta solución no es viable. Por otro lado, los edificios protegidos por su valor histórico, patrimonial, arquitectónico, artístico, cultural o estético pueden llegar a quedar excluidos del cumplimiento de la normativa sobre eficiencia energética. No obstante, incluso en estos casos, es fundamental que estos inmuebles se adecuen, para que no sean infrutilizados o abandonados. Además, muchos de los edificios protegidos no son monumentos, sino distintos tipos de edificios singulares. De hecho, muchos de los edificios catalogados son, en su mayoría, viviendas. Por ello, no sólo requieren de un tratamiento específico de la cualidad arquitectónica, sino de adecuados niveles de confort y ahorro energético. En este contexto, nótese la tensión de mantener el equilibrio entre eficiencia energética y patrimonio.

La sustitución del material exterior de fachada por una capa aislante y un material impermeable y homogéneo puede implicar la desaparición de una imagen reconocible de las ciudades españolas, de una gran tradición de arquitectura construida en ladrillo, piedra u hormigón, que domina los ensanches del siglo XX y que ejemplifica la tradicional calidad constructiva de la arquitectura en España. Por tanto, el problema no es revestir para mejorar las prestaciones energéticas, sino hacerlo sin adecuarse a la composición geométrica original, ni al material o textura del edificio preexistente, mediante la aplicación generalista y estandarizada de un sistema técnico insensible a la fachada a rehabilitar. No se trata de negar las intervenciones de mejora, sino exigir que estas se hagan con criterios de calidad, no sólo material y técnica, sino arquitectónica, atendiendo a la escala y posición urbana de cada edificio, al trazado y ritmo de sus llenos y vacíos, a la textura y composición de sus fábricas constructivas, a su color...en definitiva, a los valores arquitectónicos no solo de aquellos edificios que han adquirido una condición singular en las ciudades, sino también de tantos edificios humildes del paisaje urbano cuya herencia depende de su custodia. Cuando no existe una protección de la fachada por parte de las normas urbanísticas u ordenanzas municipales, es necesario apelar a la lógica para que las intervenciones para reducir los consumos energéticos sean específicas y adecuadas a cada objeto arquitectónico. La fachada puede adecuarse para su conservación, habitabilidad, seguridad y accesibilidad, pero según su naturaleza y características propias, sin comprometer sus valores arquitectónicos, aunque no se trate de un edificio catalogado. En este contexto, resulta fundamental el desarrollo de sistemas de aislamiento por el interior del edificio que logren resultados satisfactorios para mejorar la eficiencia energética y el confort de sus habitantes.

En el ámbito de la rehabilitación edificatoria, el coste (Delmastro et al., 2016) y la optimización del espacio (Laaouatni et al., 2019) son dos de las principales razones que exigen la disminución del espesor de los elementos constructivos. Sin embargo, esta reducción afecta en gran medida a la inercia térmica de la envolvente y la hace insuficiente para amortiguar eficazmente las oscilaciones debidas a la variación de la temperatura exterior. Por el contrario, la renovación energética del edificio exige una mejor capacidad aislante de la fachada. En estas condiciones, cuando únicamente es viable la intervención por el interior del edificio, la optimización del espesor del aislamiento, considerando aislamientos con la adecuada capacidad aislante, juega un papel importante para alcanzar un compromiso viable entre el confort, coste de la intervención y consumo de energía durante el resto de su vida útil. En resumen, la rehabilitación de una fachada por el interior del edificio, para mejorar su eficiencia energética, ha de considerar la reducción de la demanda y consumo de energía, el coste de la intervención teniendo en cuenta todo su ciclo de vida, y la reducción del espacio interior habitable.

El aumento de espesor del cerramiento de fachada hacia el interior, derivado de una renovación energética, no sólo reduce la superficie útil de un edificio, sino que puede llegar a mermar su habitabilidad, al no cumplir con alguno de los parámetros dimensionales (sea en superficie, longitud, anchura e incluso altura) definidos por los planes generales de ordenación urbana (PGOU), o el documento básico de seguridad, utilización y accesibilidad del CTE (CTE DB-SUA), entre otros. Por otro lado, el aumento de espesor de fachada puede conllevar a tener que recurrir a soluciones no convencionales para resolver numerosos elementos constructivos de la misma, como alféizares, albardillas, vierteaguas, jambas o dinteles. Si se aumenta el espesor de la fachada, puede que haya que utilizar piezas artesanales o fabricadas expofeso (con un incremento no lineal de su coste) o que haya que cambiar la solución constructiva elegida.

La búsqueda de soluciones de aislamiento por el interior que minimicen el espesor de la fachada y, por tanto, maximicen el espacio útil interior, es una demanda generalizada por parte de todos los agentes que intervienen en el proceso edificatorio. Por ello, los diferentes sistemas intentan alcanzar las máximas prestaciones con el mínimo espesor. En relación con los sistemas de aislamiento térmico por el interior, estos pueden clasificarse según se trate de un cerramiento multicapa en el que haya una cámara de aire suficiente o no. En el primero de los casos, dos técnicas se postulan como las más habituales: la insuflación y la inyección, mediante lana mineral a granel, fibras de celulosa, gránulos de poliestireno expandido (EPS), o espuma de poliuretano (PUR). Cuando la cámara de aire no es suficiente o es inexistente, la renovación energética de la fachada por el interior pasa por construir un trasdosado directo, indirecto o autoportante, que incluye una capa de aislamiento como rollos de lana mineral, planchas de EPS, de poliestireno extruido (XPS), de espuma rígida PUR, o de espuma rígida de poliisocianurato (PIR), entre otros. De esta forma, se pueden eliminar o, al menos, mitigar, la mayoría de los puentes térmicos.

La comparación entre diferentes aislamientos térmicos que puedan ser utilizados por el interior del edificio requiere que se establezcan cuáles son tanto los costes de material como los costes de su instalación. Son numerosas las bases de datos de precios de la construcción que se utilizan en España, entre las que destacan PREOC (Atayo), CENTRO (Colegio Oficial de Aparejadores, Arquitectos Técnicos e Ingenieros de Edificación de Guadalajara) o Generador de Precios (CYPE Ingenieros), herramienta de libre acceso que incluye productos genéricos y de fabricantes. Por su accesibilidad y variabilidad, se elige esta herramienta para determinar los costes de material e instalación, salvo los costes del material de referencia, la solución Solstice, suministrados por el fabricante Honeywell. Por otro lado, dado que no se pretende establecer diferencias entre las distintas opciones de revestimiento final interior, los costes diferenciales entre las formas de colocación de un mismo revestimiento quedan fuera de alcance.

2. Objetivos.

El objetivo del estudio es determinar la posición teórica de un aislante de altas prestaciones (Solstice de Honeywell) frente a soluciones tradicionales de aislamiento por el interior en edificios residenciales. Este posicionamiento incluye:

- a) Identificar en qué condiciones sería ventajoso frente a la competencia.
- b) Cuantificar la ventaja anterior (ahorro energético y/o económico):
 - b.1.) A igualdad de espesor de aislante aumento de las prestaciones;
 - b.2.) A igualdad de resistencia térmica de aislamiento reducción de la inversión inicial.

La comparación entre las soluciones de aislamiento se realiza bajo dos escenarios:

- Cumplimiento de la reglamentación vigente en España (valores límite del CTE).
- Cumplimiento de los requerimientos del estándar Passivhaus.

3. Metodología.

La búsqueda de las situaciones en las que un aislante de altas prestaciones es ventajoso frente a la competencia y la cuantificación de dicha ventaja se ha basado en un estudio paramétrico exhaustivo en un marco de comparación de 3 edificios de viviendas unifamiliares y 2 edificios de viviendas plurifamiliares, como resume la Figura 2, ubicados en las 5 zonas climáticas peninsulares asociadas al periodo de calefacción, mostradas en la Figura 3, utilizando los equipos de calefacción y refrigeración de referencia definidos en la Tabla 4.5-HE0 del Documento Básico He del CTE (Gobierno de España, 2019) mostrada en la Tabla 1, utilizando como indicador para toma de decisiones el Coste de Ciclo de Vida (CCV) (European commission, 2012), mediante cálculos basados en la herramienta nacional de verificación (HULC) (Gobierno de España, 2020), filtrando las combinaciones que cumplen el CTE (Gobierno de España, 2019) e identificando las combinaciones que, a su vez, también cumplen el estándar Passivhaus (Dequaire, 2012; Feist et al., 2007).

Figura 2. Tipologías de vivienda consideradas en el estudio paramétrico

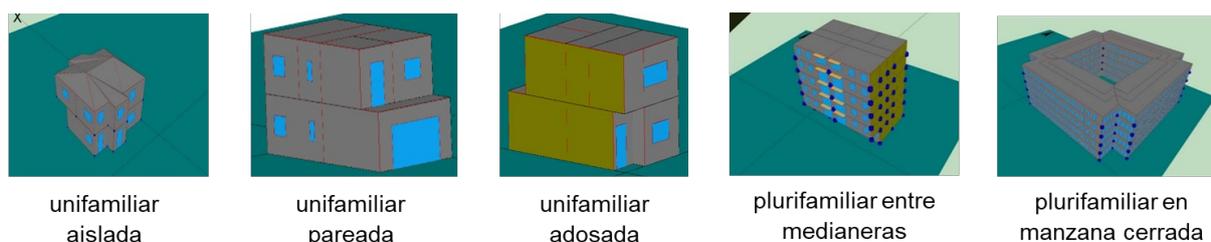


Figura 3. Zonas climáticas para régimen de calefacción (invierno) y refrigeración (verano)

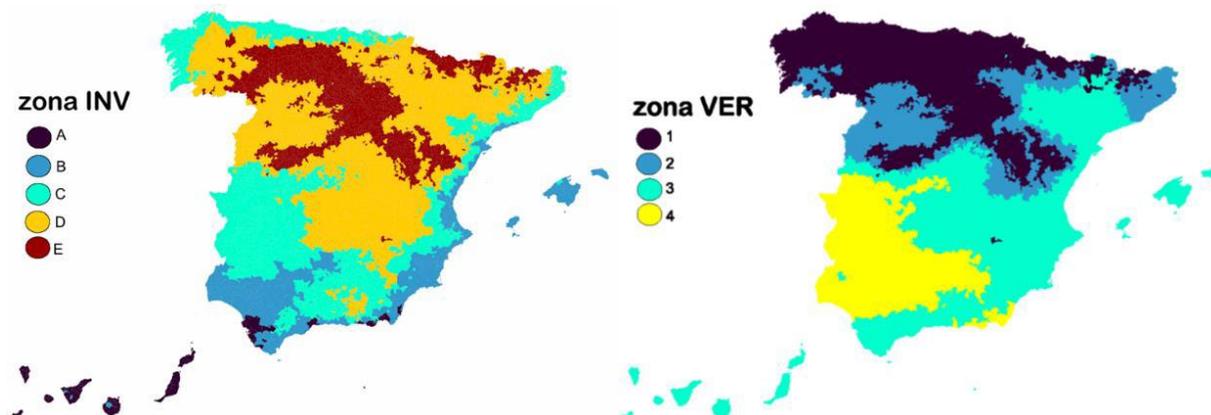
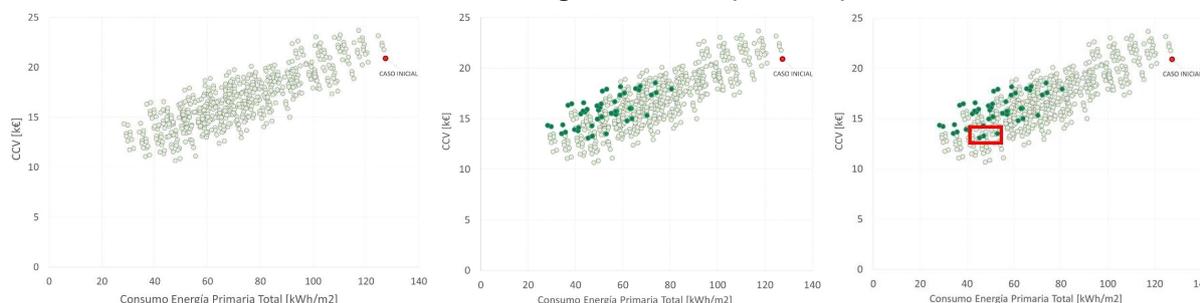


Tabla 1. Tabla 4.5.-HE0: Sistemas de referencia para producción de calor y frío en viviendas

Tecnología	Vector energético	Rendimiento nominal
Producción de calor y ACS	Gas natural	0,92 (PCS)
Producción de frío	Electricidad	2,60

El cálculo del CCV, realizado en una doble vuelta, ha permitido obtener el objetivo buscado. En la primera vuelta se consideran todos los elementos constructivos que condicionan el comportamiento térmico de cada edificio en cada caso (aislamiento de muros de fachada, cubiertas y suelos, calidad de las carpinterías, tratamiento de puentes térmicos, estanqueidad de las carpinterías, ventilación sanitaria, elementos de control solar y ventilación nocturna). Con el fin de realizar un estudio lo menos sesgado posible, el escenario de cálculo utilizado es el que cumple con el artículo 4 de la directiva 2010/31/EU (Zangheri et al., 2022). En la Figura 4 (izquierda) se muestra un ejemplo del resultado de las combinaciones anteriores en términos del coste del ciclo de vida (eje de ordenadas) frente al consumo de energía primaria (eje de abscisas). Una vez que se tienen las combinaciones del estudio anterior, se eliminan aquellas que no satisfacen los requisitos (valores límite) del CTE, según se muestra en la Figura 4 (centro). Seguidamente, se eligen las tres combinaciones que tienen el menor CCV, como recoge la Figura 4 (derecha). Por ello, una vez terminada la primera vuelta, se tienen 3 combinaciones de calidades constructivas que, junto a las instalaciones de referencia (ver Tabla 1), garantizan el cumplimiento del CTE y a la vez se encuentran en la zona de coste óptimo.

Figura 4. Combinaciones de calidades constructivas de la envuelta (izquierda), Soluciones que satisfacen todos los requisitos mínimos del CTE (centro), Selección de las tres combinaciones a utilizar en segunda vuelta (derecha)



Eliminando de cada combinación las transmitancias resultantes de los muros de fachada, se obtiene un punto de partida de objetividad incuestionable para comparar las diferentes soluciones de aislamiento por el interior. Si se hubieran cogido peores calidades constructivas que las derivadas de esta primera fase, el cumplimiento de la reglamentación hubiera conllevado niveles de aislamiento mayores en los muros de fachada y el resultado estaría sesgado. Por tanto, con el escenario descrito se puede garantizar que los resultados son garantistas. En resumen, se han obtenido tres combinaciones para cada tipología edificatoria y cada zona climática. En total, 25 conjuntos de tres combinaciones. En la segunda vuelta se establecen tres pares de comparaciones para soluciones de aislamiento de los muros de fachada por el interior:

- Solstice de Honeywell frente a lana mineral (MW)
- Solstice de Honeywell frente a Poliéstireno expandido con grafito (EPS-G)
- Solstice de Honeywell frente a Poliisocianurato (PIR HC)

La Tabla 2 muestra las conductividades y costes de los aislantes utilizados, habiéndose neutralizado el coste del trasdosado para todas las soluciones

Tabla 2. Conductividad y costes de los aislantes en estudio.

Tipo de Aislante	Conductividad (W/m·K)	Precio aislante por espesor (€/m ² ·cm)	Precio aislante por resistencia (€/m ² ·W/m ² ·K)	Mano de obra (€/m ²)
MW	0,035	0,80	2,80	2,15
EPS-G	0,032	0,70	2,20	5,00
PIR HC	0,022	2,10	4,60	5,00
Solstice	0,018	3,15	5,65	5,00

4. Resultados.

Los resultados se han sintetizado en dos grupos, que corresponden con casos en los que los dos aislantes que se comparan tienen la misma resistencia térmica y con casos en los que los dos aislantes que se comparan tienen el mismo espesor.

4.1. Igualdad de Resistencia Térmica.

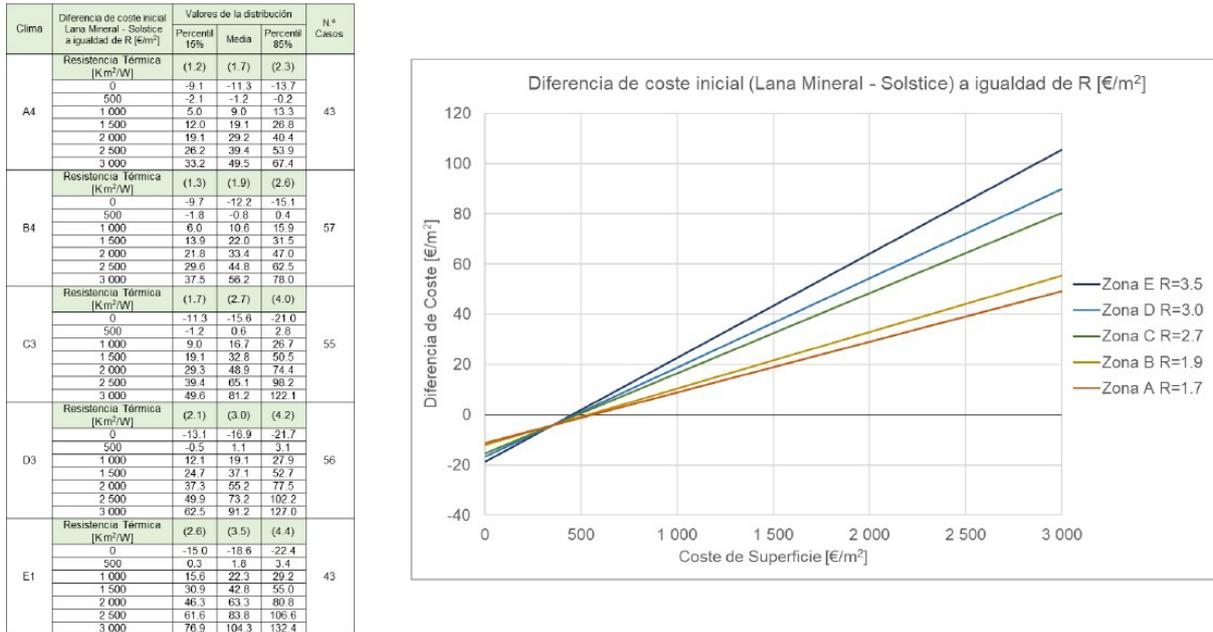
Para cada combinación de cada tipología edificatoria en cada zona climática se comienza con el nivel de aislamiento de los muros de fachada que verifica simultáneamente las dos exigencias de aislamiento relacionadas. La transmitancia de partida supone una cierta resistencia térmica debida al aislamiento. Esta resistencia es única para los dos aislamientos y lógicamente implica un espesor de aislante diferente para cada uno de ellos. A partir de ahí, se va aumentando progresivamente la resistencia térmica de los dos aislamientos de manera simultánea hasta llegar a un valor límite de transmitancia económicamente justificable que se ha obtenido en condiciones favorables al componente que se está considerando. En el caso la fachada esta transmitancia límite es la que recoge la Tabla 3:

Tabla 3. Conductividad y costes de los aislantes en estudio.

Zona climática	A	B	C	D	E
Transmitancia mínima esperada en muros de fachada (W/m ² ·K)	0,30	0,27	0,20	0,18	0,16

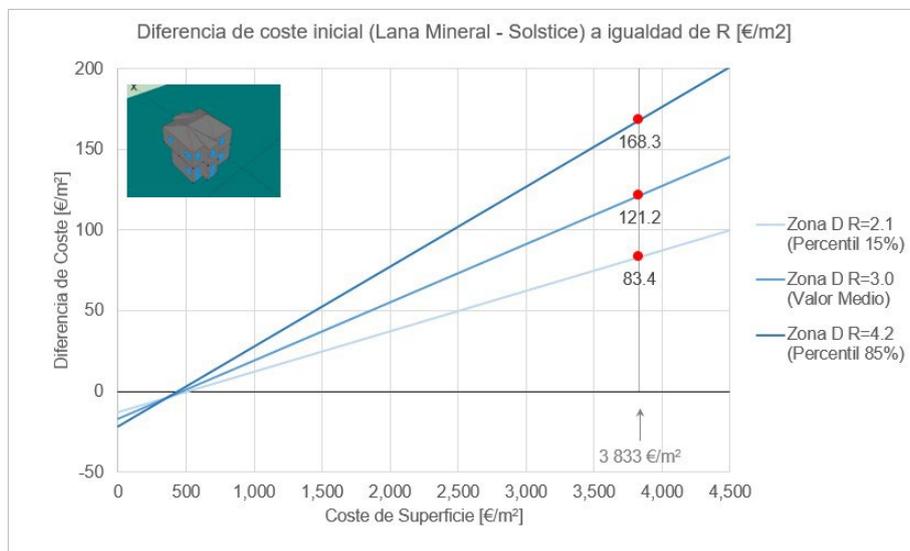
De la base de datos así formada se retienen únicamente aquellos resultados que cumplen las exigencias CTE, las exigencias del estándar Passivhaus, o ambas simultáneamente. En el caso del CTE, puesto que ya se ha garantizado las exigencias prescriptivas (en particular los límites de transmitancia), las exigencias prestacionales que restan por verificar son las relativas al consumo de energía primaria total (kWh/m²·año) la del consumo de energía primaria no renovable (kWh/m²·año). En el caso del estándar Passivhaus, una vez cumplidas las exigencias prescriptivas, las exigencias que hay que cumplir son la demanda máxima de calefacción (15 kWh/m²·año), la carga punta máxima de calefacción (10 W/m²) y el consumo máximo de energía primaria total (120 kWh/ m²·año). Hay que indicar que, para el cálculo de esta energía primaria, el estándar Passivhaus considera todos los usos energéticos del edificio mientras que en el caso del CTE los únicos usos considerados son calefacción, refrigeración y ACS. Una vez que los datos se han filtrado, se ha realizado un análisis estadístico de los mismos, la muestra resultante se ha caracterizado por sus valores medios y por los percentiles del 15% y del 85%. La Figura 5 es un ejemplo de los resultados obtenidos.

Figura 5. Ejemplo de resultados correspondientes a casos con igualdad de resistencia térmica.



La interpretación de los resultados se hace fácilmente si se concreta una zona climática, por ejemplo, la zona D3 en la que se encuentra Madrid capital. Estos resultados se recogen en la Figura 6, que compara la diferencia de coste inicial de la intervención entre el Solstice y el aislante de comparación (MW) por m² de superficie útil. Este coste incluye dos factores: el coste del aislante, mano de obra y auxiliares por un lado y el coste de la superficie útil que se pierde al poner el aislamiento por otro. Mientras que el primer coste es fijo para cada aislante, el segundo depende de la valoración concreta que se haga de la vivienda que se está rehabilitando. En el eje de abscisas aparece dicha valoración en €/m² de superficie útil. Si no se le da ningún valor a la superficie útil conservada, el coste inicial usando MW es lógicamente menor que usando Solstice. La diferencia de costes varía entre -15 a -21 €/m². Para valoraciones del m² de vivienda del orden de los 500 €/m² el coste total de las dos soluciones de aislamiento es prácticamente el mismo. Por tanto, si se toma el valor medio del m² de la vivienda usada en Madrid (3.833 €/m²), la diferencia de coste oscilaría entre 168,30 y 83,40 €/m² para los percentiles del 85% y del 15% respectivamente, con un valor medio de 121.20 €/m².

Figura 6. Diferencia del coste del aislamiento de fachada (MW–Solstice) a igualdad de R en función del valor que se atribuya a la superficie útil, para viviendas unifamiliares aisladas en Madrid, internalizando en el coste de aislamiento el precio de la superficie conservada.



4.2. Igualdad de Espesor

Un segundo tipo de resultados compara los aislamientos dos a dos en el supuesto de que el espesor de aislamiento es el mismo en los dos aislantes. La diferencia entre las dos soluciones de aislamiento no contempla la superficie útil conservada (o perdida según el punto de vista que se tome) puesto que es la misma en ambos casos. La diferencia se debe por tanto al mayor coste inicial de la solución Solstice frente al aislamiento de comparación, a un mayor ahorro energético (reducción de la demanda de calefacción) de la solución Solstice frente al aislamiento de comparación y a una menor demanda de calefacción del Solstice frente al aislamiento de comparación, que se traduce en un mayor ahorro económico derivado del menor coste de operación de la instalación de producción de calor para calefacción (caldera de gas natural). Comparando el mayor coste inicial con el menor coste de operación es posible determinar el aumento del periodo de recuperación del capital adicional invertido cuando se usa Solstice frente al aislamiento de comparación.

El uso del aislamiento de comparación frente a no poner ningún aislamiento tiene un coste inicial, una reducción del coste de operación de la calefacción y, consecuentemente, un periodo de recuperación del capital invertido. El uso de Solstice tiene un mayor coste inicial, un mayor ahorro económico en operación y un mayor periodo de recuperación del capital invertido. La diferencia entre ambos periodos de recuperación del capital permite conocer el incremento de tiempo a partir del cual el uso del Solstice es beneficioso frente al uso del aislamiento de comparación. En la tabla 4 se dan los resultados para 5 cm de aislamiento con Solstice y 5 cm de aislamiento con MW para la vivienda unifamiliar aislada en las diferentes zonas climáticas. En la zona climática D3 en la que se encuentra Madrid, se puede observar que la inversión en Solstice se recupera en 7,3 años, mientras que la inversión en MW se recupera en 5,7 años. Por tanto, la diferencia entre ambos periodos de recuperación es de 1,6 años.

Tabla 4. Resultados a igualdad de espesor para Solstice frente a MW (vivienda aislada sur)

		Unifamiliar Aislada Sur					
Solstice vs		Espesor (cm)	A4	B4	C3	D3	E1
Lana Mineral							
1	Coste Solstice (€/m ²)	5	63.3	63.3	63.3	63.3	63.3
2	Coste Lana Mineral (€/m ²)	5	42.1	42.1	42.1	42.1	42.1
3	Reducción Demanda Calefacción Solstice (kWh/m ² /año)	5	14.9	23.6	42.2	58.7	73.8
4	Reducción Demanda Calefacción Lana Mineral (kWh/m ² /año)	5	13.0	20.4	36.1	50.1	62.8
6	PRC Solstice	5	23.6	16.1	10.1	7.3	5.9
7	PRC Lana Mineral	5	18.0	12.4	7.8	5.7	4.6
6-7		5	5.6	3.7	2.2	1.6	1.3

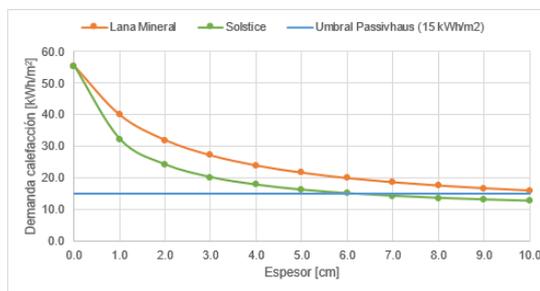
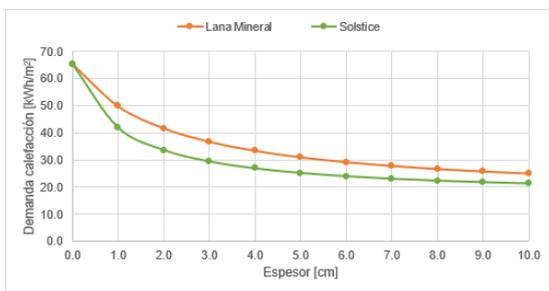
Adicionalmente, hay que tener en cuenta que existen espesores de aislamiento de la solución de comparación para los cuales no se verificarían las exigencias del CTE, las del estándar Passivhaus o ninguna de las dos, mientras que con el mismo espesor, la solución Solstice permitiría ver si se verificarían todas o algunas de las exigencias citadas. Para poder verificar estas exigencias, tendría que usarse mayor espesor del aislante de comparación, lo cual haría intervenir en la comparación el valor de la superficie útil que se perdería en por el mayor espesor a utilizar.

La Figura 7 muestra el cumplimiento de las exigencias del CTE prescriptivas y prestacionales (superior izquierda), la exigencia del valor límite de la demanda de calefacción del estándar Passivhaus (superior derecha) para diferentes espesores de aislamiento, así como las exigencias prescriptivas del CTE (inferior izquierda), excepto las relativas a la transmitancia de fachada, y del estándar Passivhaus (inferior derecha).

Figura 7. Resultados relativos a la comparación de los aislantes a igualdad de espesor

Espesor [cm]	Solstice	Lana Mineral	Comparación Solstice / Lana Mineral	
	Cumple CTE	Cumple CTE	Mejora Demanda [%]	Incremento PRC [años]
2	No	No	19.2%	0.0
4	Si	No	19.4%	1.6
6	Si	Si	17.8%	2.8
8	Si	Si	16.2%	3.9
10	Si	Si	14.7%	4.9

Espesor [cm]	Solstice	Lana Mineral	Comparación Solstice / Lana Mineral	
	Cumple Passivhaus	Cumple Passivhaus	Mejora Demanda [%]	Incremento PRC [años]
2	No	No	24.2%	0.0
4	No	No	25.5%	1.7
6	No	No	24.2%	3.0
8	Si	No	22.4%	4.1
10	Si	No	20.7%	5.1



5. Discusión

En relación con el cumplimiento del CTE y del estándar Passivhaus, se comprueba la dispersión de resultados en la demanda de calefacción entre los diferentes edificios, debido a las diferencias de compacidad y zona climática. El máximo valor de la demanda de calefacción se produce en la vivienda unifamiliar aislada situada en la zona climática E1. Por el contrario, la demanda de refrigeración, que es mucho menos sensible al tipo de edificio, se vuelve a maximizar en la misma tipología, pero en la zona climática A4. En general, el uso de las exigencias prescriptivas y las calidades de la envuelta que responden a la combinación de coste óptimo hace que todos los edificios alcancen las exigencias prestacionales del CTE (consumo de energía primaria total y consumo de energía primaria no renovable). Por tanto, no es necesario ir a equipos de prestaciones superiores a los equipos de referencia. En el caso de las exigencias prestacionales del estándar Passivhaus, la situación es similar. El valor límite de la demanda de refrigeración (15 kWh/m²-año) cumple holgadamente con los requisitos prescriptivos del CTE y una implementación puntual de ventilación nocturna. Sin embargo, el valor límite de la demanda de calefacción (15 kWh/m²-año) requiere mejoras adicionales a las que propone el CTE. Únicamente en las zonas climáticas A y B los edificios que cumplen CTE cumplirían la exigencia de valor máximo de demanda de calefacción del estándar Passivhaus. Para la zona climática C la unifamiliar aislada cae fuera del estándar. Para la D todas las unifamiliares caen fuera y para la E ningún edificio que cumpla CTE cumple a la vez el estándar Passivhaus. No obstante, si a las exigencias del CTE se le añade el requisito de estanqueidad del Passivhaus (n50) y se le incorpora un sistema de doble flujo con recuperador la situación cambia drásticamente y se refuerza el nivel de aislamiento de las fachadas, el único caso que quedaría sin cumplir el estándar sería la vivienda unifamiliar aislada en las zonas climáticas D y E.

En relación con la pérdida de suelo útil al poner aislamiento por el interior, ésta depende en gran medida de las prestaciones del aislante que se utilice. La Tabla 5 recoge la diferencia de m² conservados, suponiendo que las viviendas requirieran una resistencia térmica de aislamiento de 6,5 m² K/W.

Tabla 5. Conservación de suelo tras rehabilitación (conjunto de viviendas tasadas en Sevilla)

Tasación (€/m ²)	Vivienda	Situación original (m ²)		Rehabilitación (m ² útiles conservados)		
		Sup.construida	Sup. útil	Solstice vs MW	Solstice vs EPS	Solstice vs. PIR
3.807	1	36,00	31,24	0,6	0,5	0,1
1.881	2	75,00	65,09	1,4	1,2	0,3
3.024	3	60,00	51,86	3,5	2,9	0,8
2.322	4	123,00	106,90	3,8	3,1	0,9
2.009	5	106,00	92,13	1,9	1,6	0,5
1.120	6	72,50	63,06	1,8	1,5	0,4
995	7	50,50	44,03	2,1	1,7	0,5
1.561	8	66,00	57,66	2,2	1,8	0,5
1.085	9	56,00	48,93	1,9	1,6	0,4
1.783	10	72,50	63,16	1,8	1,5	0,4

En relación con los valores umbrales de precio de la superficie útil de suelo que hacen competitiva a la solución Solstice a igualdad de resistencia térmica, se identificó un valor umbral del precio de la superficie útil de la vivienda que, a partir del mismo, la inversión usando la solución Solstice fuera menor que la inversión usando el aislante de comparación. La Tabla 6 muestra los valores umbrales para todos los edificios y las tres comparaciones efectuadas. Puede comprobarse fácilmente que los valores umbrales son significativamente inferiores a los precios de mercado del m² de superficie útil en todas las comunidades y provincias españolas, tal y como recoge la Figura 8.

Tabla 6. Valores umbrales del precio del suelo conservado para los edificios en estudio (€/m²)

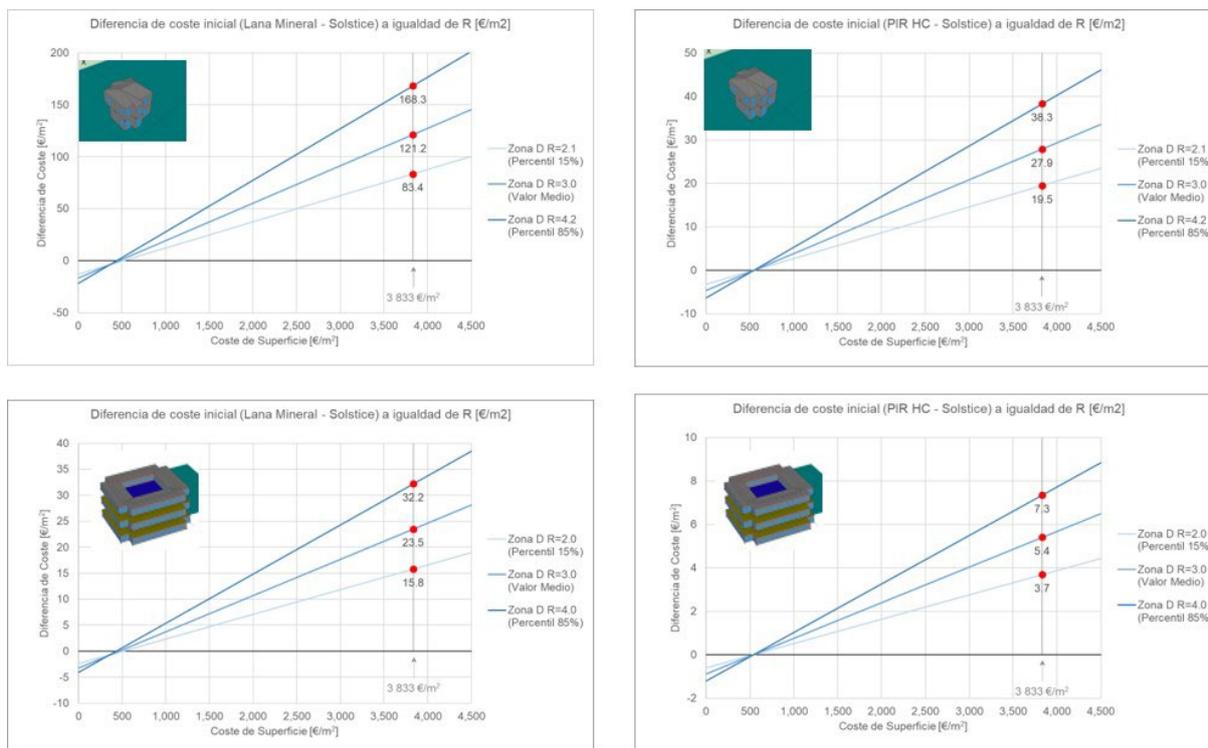
Comparación	Unifamiliar Aislada	Unifamiliar Pareada	Unifamiliar Entre Medianeras	Plurifamiliar Entre Medianeras	Plurifamiliar En Manzana Cerrada
Solstice vs MW	425 a 751	465 a 873	415 a 755	389 a 552	416 a 780
Solstice vs EPS	516	565	503	472	505
Solstice vs PIR	546	598	533	500	535

Figura 8. Precio de la superficie útil. Fuente: Índice Inmobiliario Fotocasa (mayo 2022, en €/m²)



En relación con la reducción del coste inicial de la inversión en aislamiento por el interior en fachada, a igualdad de resistencia térmica, y puesto que los valores umbrales descritos son, en todos los casos, inferiores a los valores de mercado, es evidente que, si se internaliza el precio de la superficie útil conservada, la inversión inicial requerida con la solución Solstice es inferior a la que se requeriría con cualquiera de los aislantes de comparación. Con el fin de tener más perspectiva, se reproducen en la Figura 9 los valores que se corresponderían con los edificios de máximo y mínimo ahorro (vivienda unifamiliar aislada y vivienda plurifamiliar en manzana cerrada respectivamente) y los aislantes de comparación de mayor y menor conductividad (MW y PIR HC respectivamente).

Figura 9. Diferencia de coste inicial para viviendas en Madrid usando los aislantes con el menor y el mayor valor de conductividad



En relación con el cumplimiento del CTE y del estándar Passivhaus a igualdad de espesor con la solución Solstice y los aislamientos de comparación, la inspección de los resultados pone de manifiesto que, con gran frecuencia, para un mismo espesor de aislamiento, la solución Solstice permite satisfacer las exigencias reglamentarias o las del estándar Passivhaus, mientras que se requiere un mayor espesor para el aislante de comparación. A modo de ejemplo, la Tabla 7 muestra resultados para la vivienda unifamiliar aislada en zona C. Las comparaciones con trama de fondo amarillo permiten constatar la afirmación anterior.

Tabla 7. Ejemplo de aplicación del CTE y el estándar Passivhaus a igualdad de espesor para la vivienda unifamiliar aislada en zona C

Espesor [cm]	Solstice	Lana Mineral
	Cumple CTE	Cumple CTE
2	No	No
4	Si	No
6	Si	Si
8	Si	Si
10	Si	Si

Espesor [cm]	Solstice	Lana Mineral
	Cumple Passivhaus	Cumple Passivhaus
2	No	No
4	No	No
6	No	No
8	Si	No
10	Si	No

En relación con el aumento del periodo de amortización del extra-coste si se utiliza la solución Solstice o los aislamientos de comparación, a igualdad de espesor, el uso de la solución Solstice conlleva un mayor coste inicial, pero da lugar a un edificio más eficiente energéticamente. El ahorro energético (y el consiguiente ahorro económico) así conseguido permite conocer la diferencia entre los años que tarda en recuperarse la inversión en Solstice y los años que tarda en recuperarse la inversión en el aislante de comparación. La Tabla 8 muestra un resumen de los aumentos del periodo de recuperación de la inversión que se acaba de comentar. Como puede observarse, en las zonas climáticas severas de calefacción (C, D y E) el aumento del periodo de recuperación de la inversión no llega nunca a los tres años, siendo frecuentes las situaciones en las que no se supera el año.

Tabla 8. Resumen del análisis a igualdad de espesor (5 cm)

UNIFAMILIARES							PLURIFAMILIARES						
Solstice vs. Lana Mineral	Espesor (cm)	A3	B4	C3	D3	E1	Solstice vs. Lana Mineral	Espesor (cm)	A3	B4	C3	D3	E1
Extra-coste (€/m ²)	5	7.5-21.2	7.5-21.2	7.5-21.2	7.5-21.2	7.5-21.2	Extra-coste (€/m ²)	5	4.1-5.2	4.1-5.2	4.1-5.2	4.1-5.2	4.1-5.2
Reducción demanda calefacción (%)	5	15.0-24.1	12.2-21.8	10.8-18.7	12.1-17.7	11.9-16.8	Reducción demanda calefacción (%)	5	11.4-16.7	10.0-14.7	10.4-13.1	10.7-12.0	10.0-11.8
Incremento al PRC (años)	5	5.6-10.4	3.7-5.5	2.2-2.7	1.6-1.9	1.3-1.5	Incremento al PRC (años)	5	4.2-9.1	2.6-4.9	1.6-2.3	1.1-1.5	0.9-1.2
Solstice vs. EPS Grafito	Espesor (cm)	A3	B4	C3	D3	E1	Solstice vs. EPS Grafito	Espesor (cm)	A3	B4	C3	D3	E1
Extra-coste (€/m ²)	5	6.3-17.8	6.3-17.8	6.3-17.8	6.3-17.8	6.3-17.8	Extra-coste (€/m ²)	5	3.5-4.3	3.5-4.3	3.5-4.3	3.5-4.3	3.5-4.3
Reducción demanda calefacción (%)	5	12.9-21.0	10.5-19.0	9.2-16.2	10.4-15.3	10.2-14.6	Reducción demanda calefacción (%)	5	9.7-14.4	8.5-12.6	8.9-11.3	9.2-10.4	8.6-10.2
Incremento al PRC (años)	5	4.6-8.5	3.0-4.5	1.8-2.2	1.3-1.6	1.1-1.2	Incremento al PRC (años)	5	3.4-7.4	2.2-4.0	1.3-1.9	0.9-1.3	0.7-1.0
Solstice vs. PIR HC.	Espesor (cm)	A3	B4	C3	D3	E1	Solstice vs. PIR HC.	Espesor (cm)	A3	B4	C3	D3	E1
Extra-coste (€/m ²)	5	2.7-7.6	2.7-7.6	2.7-7.6	2.7-7.6	2.7-7.6	Extra-coste (€/m ²)	5	1.5-1.8	1.5-1.8	1.5-1.8	1.5-1.8	1.5-1.8
Reducción demanda calefacción (%)	5	4.3-7.5	3.5-6.8	3.1-5.7	3.5-5.4	3.4-5.1	Reducción demanda calefacción (%)	5	3.2-4.9	2.8-4.2	3.0-3.8	3.1-3.5	2.8-3.4
Incremento al PRC (años)	5	2.1-3.9	1.4-2.1	0.9-1.0	0.6-0.7	0.5-0.6	Incremento al PRC (años)	5	1.6-3.4	1.0-1.8	0.6-0.9	0.4-0.6	0.3-0.4

6. Conclusiones

En resumen, la rehabilitación térmica sobre edificios existentes tiene el potencial de mejorar el confort térmico de sus ocupantes, reducir la factura energética de los usuarios y, por tanto, su pobreza energética, reducir las emisiones de CO₂, reducir la contaminación, aumentar el empleo y, para terminar, revalorizar los inmuebles renovados. Cuando no es posible la actuación por el exterior, por motivos urbanísticos, arquitectónicos, patrimoniales o desacuerdo entre propietarios, es necesaria la intervención sobre la fachada por el interior (ya que puede acometerse de forma individual, sin alterar además la fachada del edificio). En este caso, la optimización del espacio útil, del coste de ciclo de vida y de la inversión inicial son un condicionante que puede limitar las prestaciones de la intervención.

En el presente trabajo se han comparado los resultados obtenidos por tres soluciones: lana mineral (MW), poliestireno expandido de alta densidad con grafito (EPS-G) y la solución innovadora Solstice de Honeywell, a fin de determinar sus prestaciones, la superficie útil conservada y el retorno de la inversión de esta última respecto de las anteriores. Los resultados muestran que, por ejemplo, el uso de solución innovadora Solstice de Honeywell frente a las soluciones alternativas puede llevar a que, en un bloque de compacidad media en Sevilla, se conserve entre un 1 y un 7% de la superficie útil o bien se reduzca la demanda de calefacción entre un 8 y un 17%.

7. Referencias

- Acar, Ugur, Kaska, Onder, & Tokgoz, Nehir. (2021). Multi-objective optimization of building envelope components at the preliminary design stage for residential buildings in Turkey. *Journal of Building Engineering*, 42, 102499. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102499>
- Alonso, C., Oteiza, I., García-Navarro, J., & Martín-Consuegra, F. (2016). Energy consumption to cool and heat experimental modules for the energy refurbishment of façades. Three case studies in Madrid. *Energy and Buildings*, 126, 252-262. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.04.034>
- Barbadilla-Martín, Elena, Guadix Martín, José, Salmerón Lissén, José Manuel, Sánchez Ramos, José, & Álvarez Domínguez, Servando. (2018). Assessment of thermal comfort and energy savings in a field study on adaptive comfort with application for mixed mode offices. *Energy and Buildings*, 167, 281-289. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.02.033>
- Bastante-Ceca, Cerezo-Narváez, Piñero-Vilela, & Pastor-Fernández. (2019). Determination of the Insulation Solution that Leads to Lower CO2 Emissions during the Construction Phase of a Building. *Energies*, 12(12), 2400. <https://doi.org/10.3390/en12122400>.
- Cerezo-Narváez, Alberto, Bastante-Ceca, María-José, & Piñero-Vilela, José-María. (2021). Economic and Environmental Assessment on Implementing Solar Renewable Energy Systems in Spanish Residential Homes. *Energies*, 14(14), 4183. <https://doi.org/10.3390/en14144183>
- Cerezo-Narváez, Alberto, Piñero-Vilela, José-María, Rodríguez-Jara, Enrique-Ángel, Otero-Mateo, Manuel, Pastor-Fernández, Andrés, & Ballesteros-Pérez, Pablo. (2021). Energy, emissions and economic impact of the new nZEB regulatory framework on residential buildings renovation: Case study in southern Spain. *Journal of Building Engineering*, 42, 103054. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103054>
- Delmastro, Chiara, Mutani, Guglielmina, & Corgnati, Stefano Paolo. (2016). A supporting method for selecting cost-optimal energy retrofit policies for residential buildings at the urban scale. *Energy Policy*, 99, 42-56. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.09.051>
- Dequaire, Xavier. (2012). Passivhaus as a low-energy building standard: Contribution to a typology. *Energy Efficiency*, 5(3). <https://doi.org/10.1007/s12053-011-9140-8>
- Dickson, T., & Pavía, S. (2021). Energy performance, environmental impact and cost of a range of insulation materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 140, 110752. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110752>
- European commission. (2012). Guidelines accompanying Commission Delegated Regulation (EU) No 244/2012 of 16 January 2012 supplementing Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council. *Official Journal of the European Union*, C115.
- Feist, Wolfgang, Pfluger, Rainer, Kaufmann, Berthold, Schnieders, Jürgen, & Kah, Oliver. (2007). *Passive House Planning Package 2007. Specifications for Quality Approved Passive Houses*.
- Gobierno de España. (2019). Real Decreto 732/2019 por el que se modifica el Código Técnico de la Edificación. *Boletín oficial del estado*, 311, 140488-140674.
- Gobierno de España. (2020). *Herramienta Unificada LIDER CALENER (HULC)* (2.0.1960.1156). <https://www.codigotecnico.org/index.php/menu-recursos/menu-aplicaciones/282-herramienta-unificada-lider-calener.html>
- Goia, Francesco, Haase, Matthias, & Perino, Marco. (2013). Optimizing the configuration of a façade module for office buildings by means of integrated thermal and lighting

simulations in a total energy perspective. *Applied Energy*, 108, 515-527.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.02.063>

Guerrero Delgado, MCarmen, Sánchez Ramos, Jose, Castro Medina, Daniel, Palomo Amores, Teresa Rocío, Cerezo-Narváez, Alberto, & Álvarez Domínguez, Servando. (2022). Fresnel solar cooling plant for buildings: Optimal operation of an absorption chiller through inverse modelling. *Energy Reports*, 8, 3189-3212.
<https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.02.128>

Laaouatni, Amine, Martaj, Nadia, Bennacer, Rachid, Lachi, Mohammed, El Omari, Mohamed, & El Ganaoui, Mohammed. (2019). Thermal building control using active ventilated block integrating phase change material. *Energy and Buildings*, 187, 50-63.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.01.024>

Lizundia, I., Etxepare, L., Sagarna, M., & Uranga, E. J. (2018). El coste de la obligatoria rehabilitación energética de la vivienda colectiva: ¿un problema social? *Informes de la Construcción*, 70(551). <https://doi.org/10.3989/ic.59856>

Rando Burgos, Esther. (2021). El Pacto Verde Europeo como antesala de la Ley Europea del Clima. *Bioderecho.es*, 12. <https://doi.org/10.6018/bioderecho.460611>

Sánchez Ramos, José, Pavón Moreno, Mcarmen, Guerrero Delgado, Mcarmen, Álvarez Domínguez, Servando, & F. Cabeza, Luisa. (2019). Potential of energy flexible buildings: Evaluation of DSM strategies using building thermal mass. *Energy and Buildings*, 203, 109442. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109442>

Zangheri, Paolo, D'Agostino, Delia, Armani, Roberto, & Bertoldi, Paolo. (2022). Review of the Cost-Optimal Methodology Implementation in Member States in Compliance with the Energy Performance of Buildings Directive. *Buildings*, 12(9).
<https://doi.org/10.3390/buildings12091482>

Comunicación alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible

