



Universidad de Oviedo  
*Universidá d'Uviéu*  
*University of Oviedo*



# **ESCUELA POLITÉCNICA DE INGENIERÍA DE GIJÓN**

**GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA**

**ÁREA DE INGENIERÍA DE CONSTRUCCIÓN**

**ANÁLISIS TÉRMICO DE FACHADAS ACTIVAS CON MATERIALES  
DE CAMBIO DE FASE**

**D. FERNÁNDEZ DÍAZ, Pablo**  
**TUTORES: D<sup>a</sup>. ALONSO MARTÍNEZ, Mar**  
**D. ÁLVAREZ RODRÍGUEZ, Matías**

**FECHA: Febrero 2024**

## ÍNDICE

<b>1. Introducción .....</b>	<b>7</b>
1.1.- RESUMEN .....	7
1.2.- CONTEXTO ENERGÉTICO.....	7
1.2.1.- Emisiones de GEI en la Unión Europea .....	8
1.2.2.- Consumo energético en los edificios .....	11
1.2.3.- Reducción del consumo energético en los edificios.....	13
1.3.- ANTECEDENTES.....	14
1.3.1.- Materiales de cambio de fase .....	16
<b>2. Objetivos.....</b>	<b>20</b>
<b>3. Metodología.....</b>	<b>22</b>
3.1.- Cálculo del espesor de aislante .....	24
<b>4. Modelos numéricos y resultados.....</b>	<b>28</b>
4.1.- SOLUCIÓN TRADICIONAL.....	32
4.2.- SOLUCIÓN A .....	33
4.2.1.- Solución A2 .....	34
4.2.2.- Comparativa entre las soluciones A y A2 .....	35
4.3.- SOLUCIÓN B .....	36
4.3.1.- Comparativa entre las soluciones B y A2.....	37
<b>5. Conclusiones.....</b>	<b>39</b>
<b>6. Bibliografía.....</b>	<b>42</b>

ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b>	Emisión GEI por sectores en la UE (27) año 2019 [2] .....	8
<b>Figura 2</b>	Consumo energético final (ktep) por sectores en UE (27) en el año 2019 [4]...9	
<b>Figura 3</b>	Desglose del consumo energético del apartado “Otros sectores” en la UE (27) en el año 2019 [4] .....	10
<b>Figura 4</b>	Diagrama Sankey balance energético en la UE (27) en 2019, con los principales consumidores resaltados [3] .....	11
<b>Figura 5</b>	Infografía del consumo final de energía según uso en los hogares de la UE (27) [5] .....	12
<b>Figura 6</b>	Consumo final de energía según uso en los hogares de España (zona mediterránea) de acuerdo al IDAE [6].....	12
<b>Figura 7</b>	Esquema de aproximación para reducción de GEI.....	14
<b>Figura 8</b>	Etiqueta eficiencia energética de edificio rehabilitado con fachada ventilada (Gijón, Asturias) .....	15
<b>Figura 9</b>	Fachada ventilada (izquierda) y SATE (derecha) .....	16
<b>Figura 10</b>	Tipos de PCMs según su temperatura y entalpía de fusión [10] .....	17
<b>Figura 11</b>	Regulación térmica de componentes electrónicos en el Rover Lunar [11]..	18
<b>Figura 12</b>	Efecto en la onda térmica de diferentes inercias térmicas .....	19
<b>Figura 13</b>	Esquema de las diferentes configuraciones de fachada a estudiar .....	22
<b>Figura 14</b>	Configuración de fachada a estudiar. Catálogo de elementos constructivos del CTE [16] .....	24
<b>Figura 15</b>	Configuración de fachada tradicional con sus materiales y espesores (mm). Código 4.1 según CTE .....	27
<b>Figura 16</b>	PCM macroencapsulado del fabricante Rubitherm .....	29

<b>Figura 17</b>	Curvas de Cp y densidad del PCM Rubitherm.....	29
<b>Figura 18</b>	Mallado de fachada activa (PCM por el exterior) .....	30
<b>Figura 19</b>	Temperatura equivalente del día promedio más frío y más cálido .....	31
<b>Figura 20</b>	Condiciones de contorno del modelo. Temperatura dinámica exterior (A) y convección interior (B) .....	31
<b>Figura 21</b>	Solución A. PCM interior (izquierda) y PCM exterior (derecha) .....	33
<b>Figura 22</b>	Oscilación interna de temperatura en fachada tradicional y en A2 RT27-21 .....	36
<b>Figura 23</b>	Oscilación interna de temperatura en fachada tradicional y en A2 RT27-21 optimizada .....	38

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b>	Propiedades más comunes de los aislantes térmicos .....	26
<b>Tabla 2</b>	Propiedades físicas de los materiales comunes a todas las fachadas .....	32
<b>Tabla 3</b>	Resultados fachada tradicional. Código 4.1 según CTE.....	32
<b>Tabla 4</b>	Resultados Solución A para enero.....	33
<b>Tabla 5</b>	Resultados solución A para agosto .....	34
<b>Tabla 6</b>	Resultados solución A2 para enero .....	35
<b>Tabla 7</b>	Resultados solución A2 para agosto .....	35
<b>Tabla 8</b>	Comparativa resultados solución tradicional y A2 RT27-RT21 para enero ....	35
<b>Tabla 9</b>	Comparativa resultados solución tradicional y A2 RT27-RT21 para agosto ..	36
<b>Tabla 10</b>	Comparativa resultados solución tradicional y A2 RT27-RT21 optimizada para enero .....	37
<b>Tabla 11</b>	Comparativa resultados solución tradicional y A2 RT27-RT21 optimizada para agosto .....	37

**ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS**

**GEI:** Gases de efecto invernadero, entre los que se encuentran: dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ), óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) y gases clorofluorocarbonados (CFCs).

**tep:** Tonelada equivalente de petróleo. Valor de energía al que equivale una tonelada de petróleo ( $1 \text{ tep} = 41,87 \text{ GJ} = 11\,630 \text{ kWh}$ ).

**COP:** Coeficiente de rendimiento de una bomba de calor. Define la relación entre la energía térmica extraída del equipo y la energía eléctrica consumida. Este valor es siempre superior a 1, esto quiere decir que, por cada unidad de energía eléctrica consumida, la máquina es capaz de entregar siempre más de una unidad de energía térmica, obteniendo esa energía térmica del ambiente.

**CTE:** Código técnico de la edificación. Normativa estatal que establece las condiciones mínimas que deben cumplir las edificaciones en España, en términos de seguridad y habitabilidad. En el CTE se abordan diferentes aspectos de las edificaciones, como su seguridad estructural, seguridad en caso de incendio, accesibilidad, ahorro energético, protección frente al ruido y salubridad.

# 1. Introducción

## 1.1.- RESUMEN

En el presente Trabajo de Fin de Grado se analiza la posibilidad de incorporar materiales de cambio de fase (PCMs) a fachadas convencionales, buscando una mejora de las propiedades de la envolvente que se traduzca en una mayor eficiencia energética y confort térmico. Se llevaron a cabo simulaciones numéricas por elementos finitos, analizando diferentes configuraciones de envolvente y tipos de PCMs, con el fin de comparar su comportamiento con el de un cerramiento tradicional no adaptativo.

El uso de este tipo de materiales permite almacenar grandes cantidades de energía, en forma de calor latente, gracias al fenómeno de cambio de fase. Esto aumenta significativamente la inercia térmica del cerramiento sin la necesidad de recurrir a materiales convencionales de gran espesor.

Tras realizar las simulaciones se llegó a la conclusión de que una combinación de 2 de estos PCMs macroencapsulados es efectiva tanto en las condiciones climáticas de invierno como en las de verano, aumentando considerablemente la inercia y el confort térmico interior sin aumentar el espesor total del cerramiento.

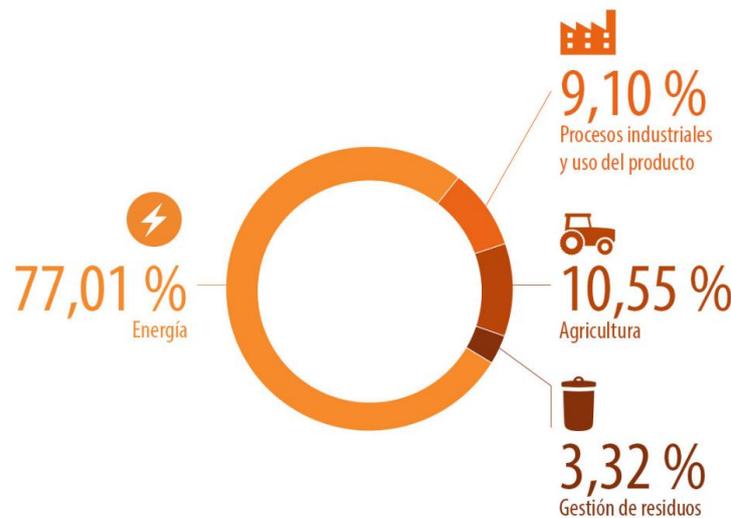
## 1.2.- CONTEXTO ENERGÉTICO

Uno de los grandes desafíos de nuestra época es la lucha contra el cambio climático, que implica adoptar medidas y buscar soluciones que mitiguen sus efectos y reviertan las condiciones ambientales y climáticas adversas que sufre nuestro planeta. Una de estas medidas es la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), cuya producción descontrolada ha llevado a un calentamiento excesivo del planeta, con las consecuencias climáticas que eso conlleva (pérdida de biodiversidad, aumento del nivel del mar, fenómenos climáticos extremos...) [1]. Con el fin de reducir las emisiones de GEI es necesario limitar de manera drástica la quema de combustibles fósiles y sustituirlos por fuentes de energía renovables. Un paso tan relevante y necesario como la implantación de energías renovables

es optimizar al máximo los sistemas de consumo actuales, haciéndolos cada vez más energéticamente eficientes, de manera que el desperdicio energético sea mínimo.

### 1.2.1.- Emisiones de GEI en la Unión Europea

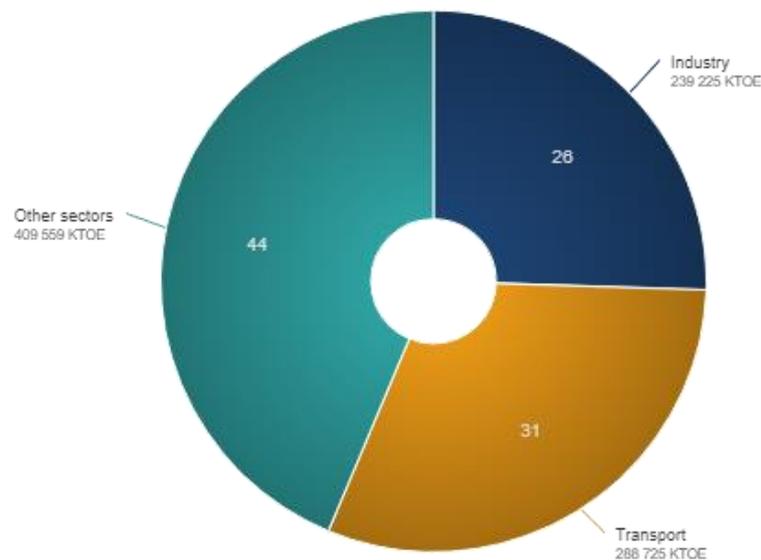
Centrándonos en el ámbito de mejora de los sistemas de consumo actuales, el sector que supone el mayor porcentaje de emisiones de GEI a nivel mundial es el energético. Se entiende por sector energético aquel que se encarga de la generación y distribución de energía, así como de su consumo final en los diferentes sectores económicos. Esta energía puede suministrarse en forma de energía eléctrica o de combustibles fósiles (gas, carbón, fueloil, gasolina...) y su generación (electricidad), extracción (carbón, petróleo y gas), procesamiento (derivados del petróleo), así como su transporte y posterior consumo final generan una huella de carbono que, dentro de la Unión Europea (UE), supuso en el año 2019 entorno al 77% del total de GEI emitidos [2] (Figura 1).



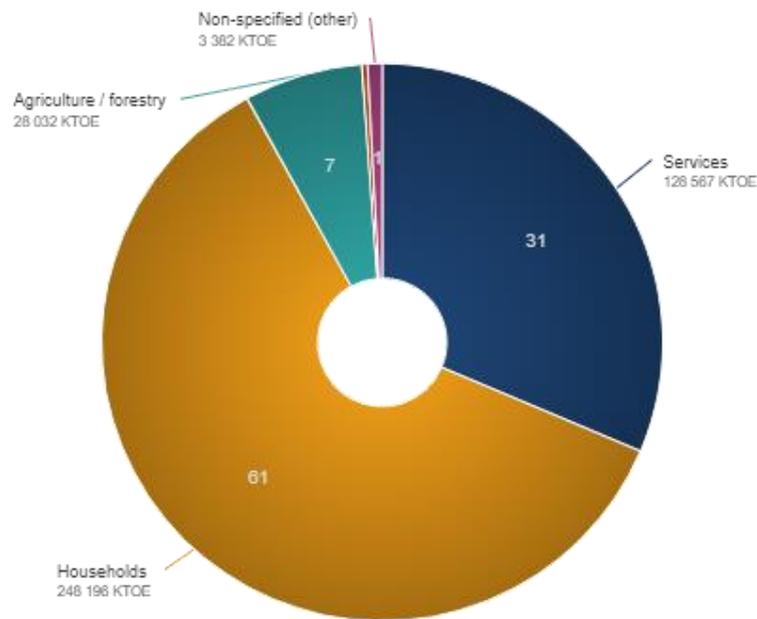
**Figura 1** Emisión GEI por sectores en la UE (27) año 2019 [2]

Se analizarán a continuación cuáles son los mayores consumidores dentro de este sector energético, y, en particular, cuáles tienen una mayor demanda de energía final. Se entiende como energía final aquella que se suministra de manera directa al consumidor después de los diferentes procesos intermedios (extracción, procesamiento, generación y transporte) y que por lo tanto supone una cantidad inferior a la energía neta entrante en el sistema (energía primaria e importaciones).

La oficina estadística de la UE (Eurostat) recopila gran cantidad de datos de cada uno de los países miembros y proporciona una herramienta muy útil para visualizar los balances energéticos mediante el uso de diagramas de flujo tipo Sankey (diagrama de flujo, en el que el ancho de las flechas es proporcional a la cantidad de flujo). Dicho diagrama representa una imagen completa del recorrido de la energía desde su generación (o importación) hasta su consumo final, así como la tipología de estos recursos energéticos (electricidad, petróleo, renovables...) pero, debido a su gran tamaño es difícil citarlo al completo [3]. Se muestran en su lugar diagramas sectoriales (Figura 2 y Figura 3) con los datos obtenidos del mismo, que representan el consumo de energía final (en unidades de kilotoneladas de petróleo equivalente, ktep) por sectores en la UE en el año 2019. [4]



**Figura 2** Consumo energético final (ktep) por sectores en UE (27) en el año 2019 [4]

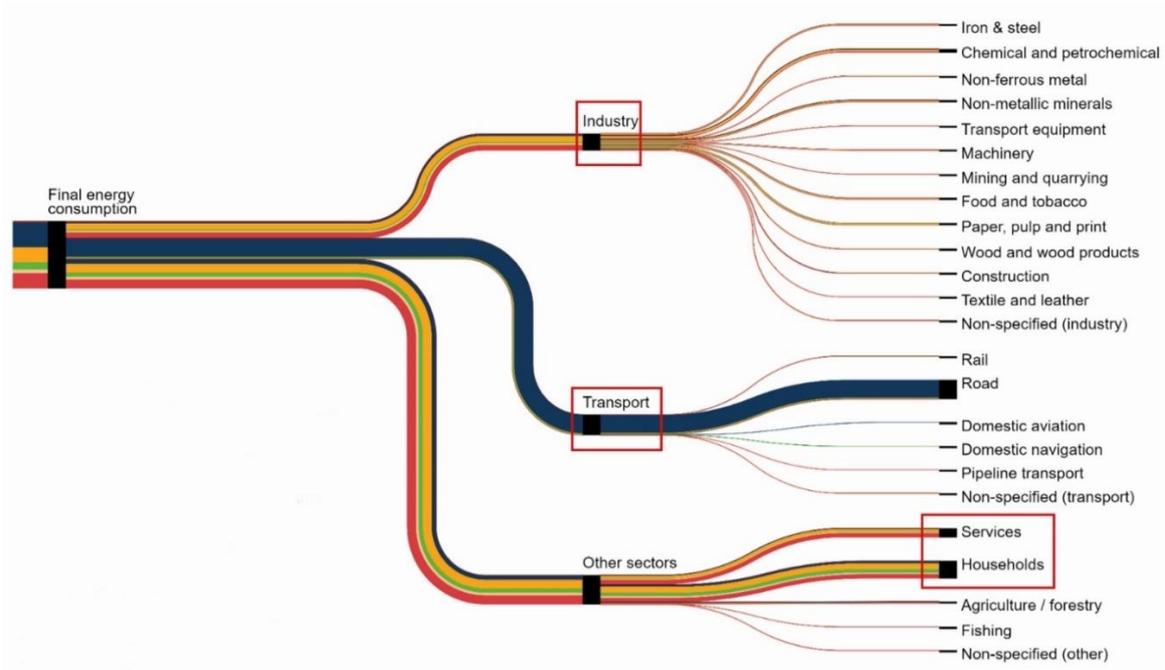


**Figura 3** Desglose del consumo energético del apartado “Otros sectores” en la UE (27) en el año 2019 [4]

Se puede observar que hay tres sectores predominantes: el industrial, el residencial y el transporte, siendo este último el que demanda una mayor cantidad de energía (31%). El segundo consumidor energético es el sector residencial, con aproximadamente el 27% de la demanda, prácticamente igualado con el industrial (26%).

El término sector residencial se refiere al consumo realizado en las residencias particulares, principalmente para calefacción, refrigeración, electrodomésticos, iluminación, etc. En el aspecto del tipo de consumo, el realizado en el sector residencial es prácticamente idéntico al del sector servicios, que refleja el gasto energético en un amplio espectro de actividades y servicios como la hostelería, comercios, la educación, la administración pública, sanidad, etc. En todas estas actividades la mayor demanda de energía proviene, al igual que en el sector residencial, de la climatización de los espacios habitables (calefacción, refrigeración, control de humedad...), electrodomésticos, iluminación...

Si, por tanto, se agrupan ambos sectores (residencial y servicios), estos son el mayor consumidor de energía final dentro de la UE, con más del 40% del total (Figura 4)

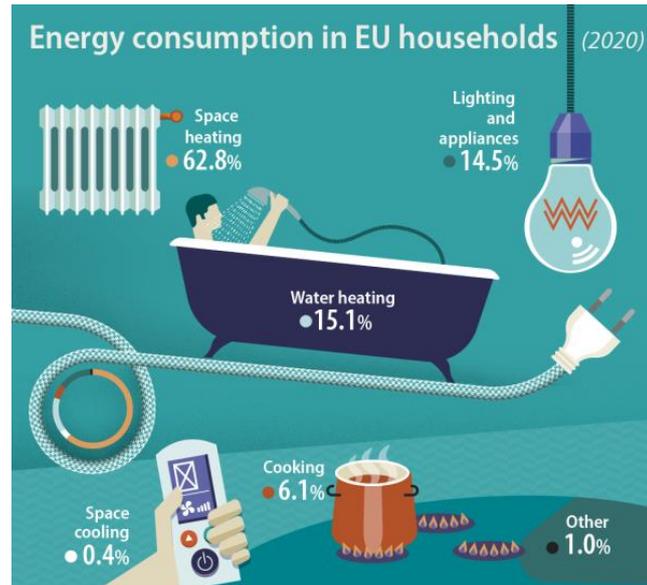


**Figura 4** Diagrama Sankey balance energético en la UE (27) en 2019, con los principales consumidores resaltados [3]

Sería interesante analizar dentro de dichos sectores (residencial y servicios) en qué se está consumiendo esa energía, con que eficiencia y cuáles podrían ser las posibles acciones de cara a optimizar estos sistemas de consumo.

### 1.2.2.- Consumo energético en los edificios

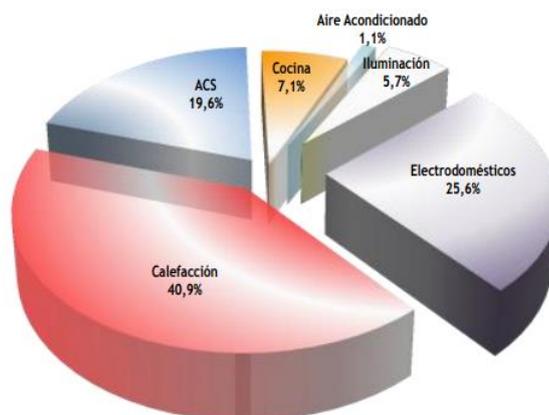
Recurriendo de nuevo a las estadísticas suministradas por Eurostat, con la infografía de la Figura 5 se muestra de manera muy visual cuáles son los principales consumidores de energía en los hogares, siendo el calentamiento de los espacios para conseguir un adecuado bienestar térmico el que supone más de la mitad del gasto energético total de la vivienda. De esta manera, la climatización de los espacios (calefacción y/o refrigeración) supone el 63,2% (62,8% + 0,4%) del total de energía consumida en las viviendas [5].



**Figura 5** Infografía del consumo final de energía según uso en los hogares de la UE (27) [5]

Estos datos son una media de los consumos de los países miembros de la UE. Por la relación entre la zona geográfica, y por tanto climática, de cada uno de estos países y sus necesidades de calefacción y/o refrigeración, los datos de consumo varían bastante según dónde nos encontremos. Para el caso de España, en concreto para la mitad sur de clima mediterráneo, esta diferencia se hace notable con respecto al resto de países europeos, de clima oceánico y continental.

La Figura 6 refleja los datos del informe Spahousec, realizado por el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía de España (IDAE). Se puede observar que para el clima mediterráneo el consumo en calefacción se ve reducido de manera notable (41 %) y a su vez el consumo en refrigeración (aire acondicionado) aumenta ligeramente (1,1%) [6].



**Figura 6** Consumo final de energía según uso en los hogares de España (zona mediterránea) de acuerdo al IDAE [6]

Aun viéndose reducido en las zonas de clima mediterráneo, el consumo en calefacción sigue siendo de manera inequívoca el principal demandante de energía dentro de los hogares.

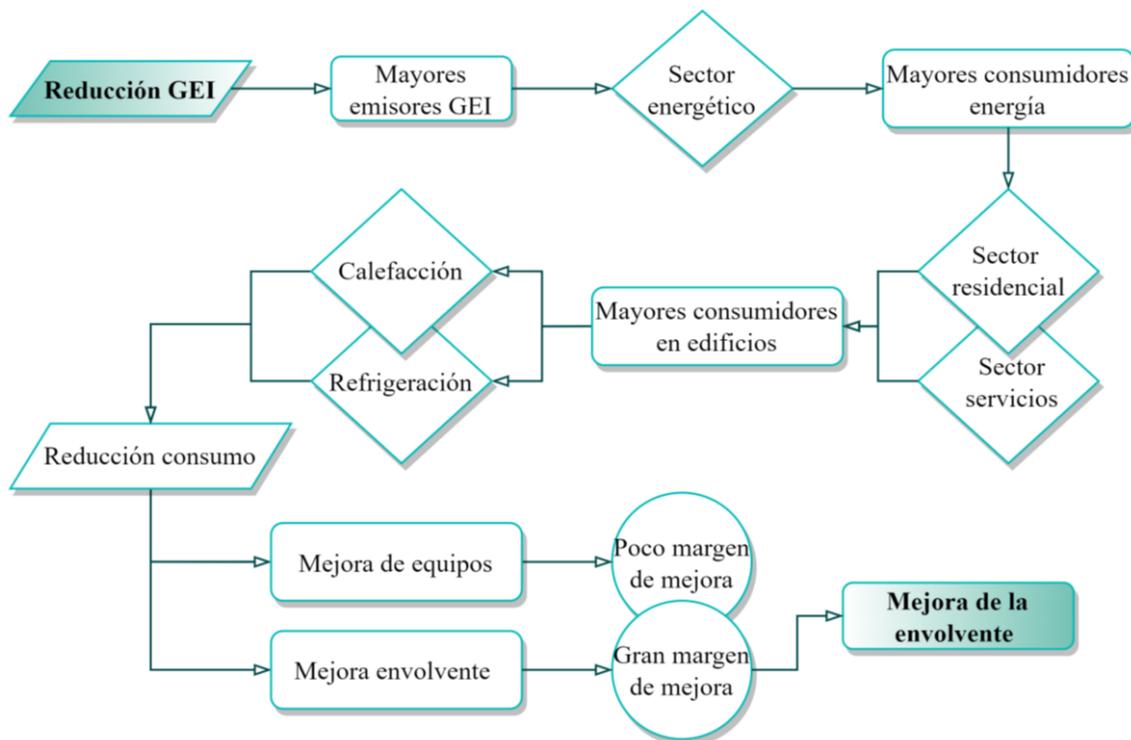
### 1.2.3.- Reducción del consumo energético en los edificios

En el camino hacia la descarbonización, un área de acción de gran impacto sería actuar sobre la energía necesaria para alcanzar unas condiciones térmicas adecuadas dentro de los espacios habitables, tanto en el sector residencial como en el servicios (comercios, oficinas, instituciones públicas...). La reducción de esta demanda energética se puede alcanzar de diversas maneras. Una de ellas sería la evolución y optimización de las tecnologías y equipos actuales, tanto calefactores como equipos de refrigeración, de manera que su eficiencia se viera mejorada sustancialmente, con la consiguiente reducción de consumo energético.

Otra de las vías, en la que se va a centrar este trabajo, consistiría de igual manera en una optimización de los sistemas actuales, pero en este caso poniendo el foco en los espacios habitables, en concreto en mejorar las características de la envolvente del edificio. Esta vía de acción posee un potencial de mejora muy superior al que ofrecería el desarrollar nuevas tecnologías de climatización o el evolucionar las actuales, teniendo en cuenta que estos equipos están muy optimizados, con rendimientos elevados, como es el caso de las bombas de calor ( $COP > 1$ ). El uso de estos equipos ultra eficientes como sistema de calefacción dentro del sector residencial es muy residual, debido a sus elevados costes de adquisición e instalación, así como por el espacio que requieren dentro de la vivienda. Aunque se resolvieran estos inconvenientes relativos a su coste y volumen y fueran sustituyendo de manera progresiva a los equipos de calefacción convencionales (calderas de gas, biomasa, gasoil, calentadores eléctricos...), su excepcional rendimiento no destacaría por seguir el problema de base, que afecta por igual a todo sistema de calefacción independientemente de lo avanzado de su tecnología, sin solucionar. Este problema base son las pérdidas y ganancias de calor de manera no controlada a través de los cerramientos de las edificaciones.

En cuanto al estado del parque inmobiliario de España, más del 50% de las viviendas tienen más de 40 años [7], siendo previas a la entrada en vigor de la primera normativa de edificación que tiene en cuenta las condiciones térmicas en los edificios (NBE-CT-79). Esta normativa imponía unos requisitos en aislamiento y eficiencia energética mínimos, considerados según el sistema de clasificación energética actual como muy ineficientes.

Tanto es así que más del 80% de las edificaciones en España tienen una clasificación energética E, F y G [8], letras referentes a las categorías menos optimizadas en términos de consumo energético.



**Figura 7** Esquema de aproximación para reducción de GEI

La antigüedad del parque inmobiliario y su consecuente ineficiencia energética ofrecen un margen de optimización enorme, siendo la mejora de la envolvente térmica de las edificaciones la estrategia más eficaz de cara a reducir de manera drástica la producción de GEI (Figura 7).

### 1.3.- ANTECEDENTES

En un reciente estudio llevado a cabo por el Laboratorio de Control de Edificación del Gobierno Vasco y el grupo de investigación ENEDI de la Universidad del País Vasco [9], en el que se analiza la eficacia de diferentes soluciones de rehabilitación en edificios de viviendas del territorio español. Se concluyó que con una rehabilitación completa de la envolvente de un edificio (instalación de fachada ventilada o de sistema de aislamiento térmico exterior, renovación de la cubierta y mejora de las ventanas) se pueden lograr reducciones en la demanda energética de entorno al 64%. Esta reducción en la demanda podría llegar a ser de hasta el 80% para edificaciones situadas en el norte de la península y

construidas en los años 80. La Figura 8 es una placa de identificación de eficiencia energética colocada sobre la fachada de un edificio tras una rehabilitación de su envolvente mediante fachada ventilada. En la placa se plasma la mejora en eficiencia del edificio en términos de emisiones de CO<sub>2</sub> anuales ( $kgCO_2/año$ ), pasando de una categoría E a una D y consiguiendo reducir dichas emisiones en un 54%.



**Figura 8** Etiqueta eficiencia energética de edificio rehabilitado con fachada ventilada (Gijón, Asturias)

Las mejoras de la envolvente en edificaciones ya construidas requieren, en la mayoría de los casos<sup>1</sup>, una modificación exterior de los cerramientos mediante la aplicación de soluciones constructivas como las fachadas ventiladas o el SATE (Sistema de Aislamiento Térmico Exterior) (Figura 9). En ambas soluciones lo que se busca es añadir capas de material aislante (incluidas cámaras de aire) que aumenten la resistividad térmica de los cerramientos y disminuyan la transmisión de calor a través de los mismos.

Se denomina fachada ventilada a la tipología de envolvente en la que la fachada del edificio y la cara exterior del revestimiento están separados por una cámara de aire no estanca, que permite cierto flujo de aire por su interior (Figura 9 izquierda). El aislamiento térmico se completa con capas de material aislante convencional, situadas en la cara de la edificación. La capa exterior suele estar constituida por materiales no aislantes que cumplen una función estética.

<sup>1</sup> se pueden utilizar técnicas de inyección de material aislante que no suponen una modificación exterior de los cerramientos.

El SATE, en cambio, carece de cámara de aire y está formado únicamente por placas de material aislante, fijadas por diferentes métodos a la fachada existente. Su revestimiento exterior está adherido al propio material aislante con la ayuda de morteros y mallas de refuerzo (Figura 9 derecha).



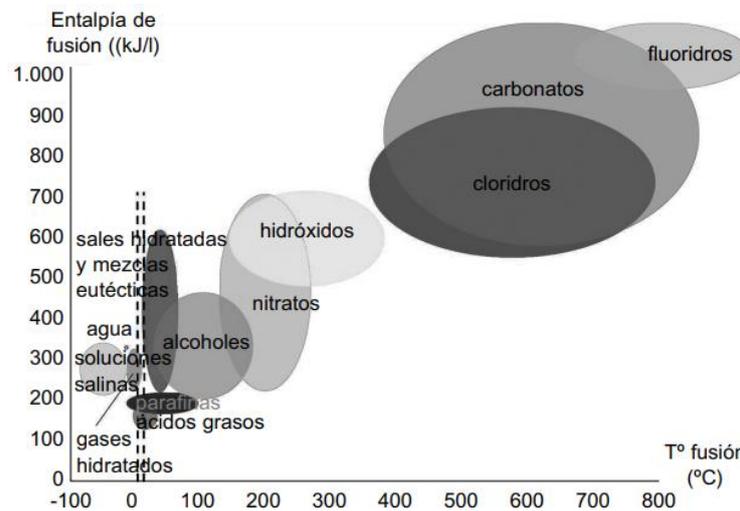
**Figura 9** Fachada ventilada (izquierda) y SATE (derecha)

Como alternativa a estos cerramientos más convencionales y de comportamiento estático surge un movimiento arquitectónico y técnico innovador que trata de dotar a las envolventes de cierta capacidad de adaptación. Así, mediante estrategias de diseño; materiales cuyas propiedades cambian con la temperatura, humedad o radiación; o añadiendo elementos o estructuras móviles, se obtienen envolventes que modifican su respuesta térmica ante los cambios de las condiciones climáticas exteriores. Son las denominadas envolventes adaptativas o fachadas activas, que serán objeto de diseño y análisis en este trabajo, en concreto las que incorporan materiales de cambio de fase.

### 1.3.1.- Materiales de cambio de fase

Los materiales de cambio de fase, conocidos como PCM de sus siglas en inglés (Phase Change Materials) son sustancias capaces de almacenar gran cantidad de energía en forma de calor latente durante sus cambios de fase. Esta energía se emplea en la transformación del material de un estado a otro, manteniendo su temperatura constante durante el proceso. Su propiedad física fundamental es el calor latente, de unidades  $J/Kg$ , que es la cantidad de energía por unidad de masa que requiere la sustancia para completar dicha transformación.

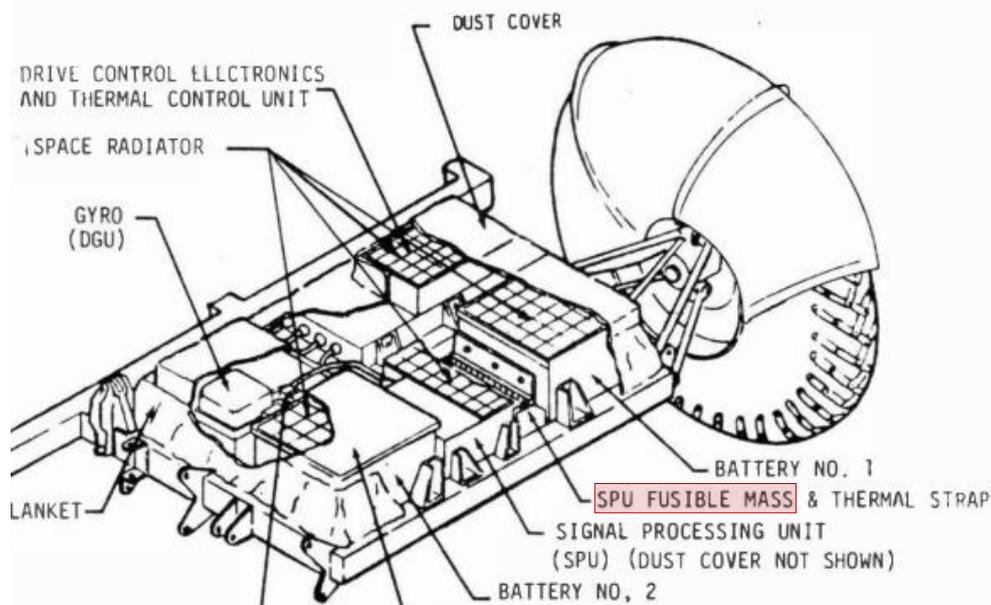
Los más utilizados son las ceras de parafina, ácidos grasos, sales hidratadas y mezclas eutécticas, cada uno con diferentes propiedades, rangos de temperaturas y de calor latente, que responden a diferentes necesidades (Figura 10). Para este estudio en concreto se analiza el uso de parafinas, en formato encapsulado por láminas de aluminio.



**Figura 10** Tipos de PCMs según su temperatura y entalpía de fusión [10]

Los campos de aplicación de este tipo de materiales son muy variados, entre los que se encuentran:

- Transporte de productos térmicamente sensibles, como pueden ser alimentos, fármacos e incluso órganos, mediante el uso de neveras y contenedores que incorporen PCMs.
- Gestión térmica de componentes electrónicos, regulando las temperaturas de elementos críticos como pueden ser las baterías (Figura 11).
- Prendas de ropa, incorporando a los tejidos pequeñas cantidades de PCMs que contribuyan a la regulación de la temperatura corporal.
- Almacenamiento de energía en forma de calor, proveniente de zonas valle de producción con renovables o para aprovechar desperdicios energéticos en forma de calor residual.
- Edificaciones, incorporando a los cerramientos PCMs en diferentes formatos, capaces de absorber las oscilaciones térmicas diarias y que contribuyan a mejorar su eficiencia energética.

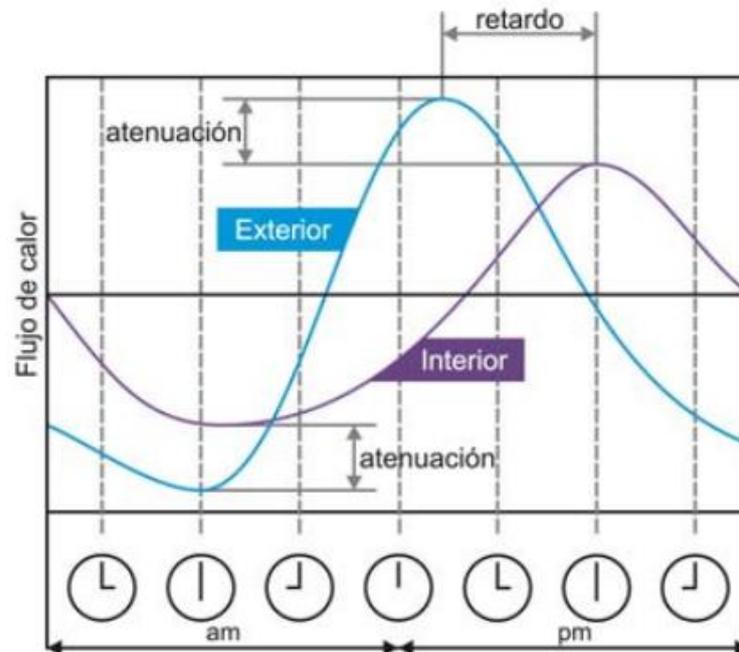


**Figura 11** Regulación térmica de componentes electrónicos en el Rover Lunar [11]

De manera tradicional el almacenamiento de energía térmica en las edificaciones se conseguía utilizando cerramientos de grandes espesores, recurriendo por ejemplo a muros de piedra o adobe. Con este tipo de materiales se aprovecha únicamente el calor sensible, es decir, la energía implicada en aumentar su temperatura sin que se produzca cambio de fase alguno. Actualmente hay soluciones de almacenamiento de energía térmica, principalmente en viviendas que trabajan con energías renovables, que utilizan materiales de alta capacidad calorífica. Es el caso de los tanques de agua, lechos de rocas o arena e incluso las propias cimentaciones de hormigón.

Estas soluciones, por aprovechar sólo el calor sensible, tienen una densidad energética menor que otras soluciones que hacen uso tanto del calor sensible como del latente, como es el caso de los PCMs, por lo que puede ser interesante su aplicación al campo de la edificación de cara a reducir los espesores de los cerramientos y aumentar la habitabilidad de los espacios. Este almacenamiento de energía térmica implica un aumento en la inercia térmica de la envolvente, propiedad que depende fundamentalmente de la densidad, capacidad calorífica, conductividad térmica y espesor de los materiales utilizados [12]. Se podría definir esta propiedad como la energía térmica que una masa es capaz de almacenar e ir liberando de manera gradual, siendo capaz de mejorar el comportamiento energético y por tanto la eficiencia de los edificios. Esto se debe a que provoca un amortiguamiento y un desfase temporal de la onda térmica externa (Figura 12), reduciendo la oscilación de temperatura en

el interior y retrasando la llegada de las temperaturas máximas al interior, de manera que caigan en franjas horarias en las que puedan ser mejor aprovechadas.



**Figura 12** Efecto en la onda térmica de diferentes inercias térmicas

## 2. Objetivos

El **objetivo principal** de este trabajo es estudiar la viabilidad y versatilidad del uso de materiales de cambio de fase, denominados PCMs, en fachadas de edificios con el fin de mejorar el comportamiento térmico de la envolvente y reducir así el consumo energético. Se comparará su eficacia frente a las configuraciones de fachadas con aislantes convencionales, analizando:

- Capacidad para mantener las condiciones de temperatura de un espacio habitable, absorbiendo las variaciones de temperatura exteriores. Se monitorizarán para ello dos parámetros, el porcentaje de amortiguación de la onda térmica exterior y la oscilación de temperatura de la cara en contacto con el interior.
- Aumento de la inercia térmica del cerramiento, medida en base al desfase horario que sufre la onda térmica exterior.
- Compacidad de la solución. Ahorro de espacio producido por una reducción en el espesor total del cerramiento.
- Rapidez con la que el cerramiento puede alcanzar la temperatura de consigna desde un estado no climatizado.

Se puede definir también una serie de **objetivos secundarios** necesarios para alcanzar el objetivo principal:

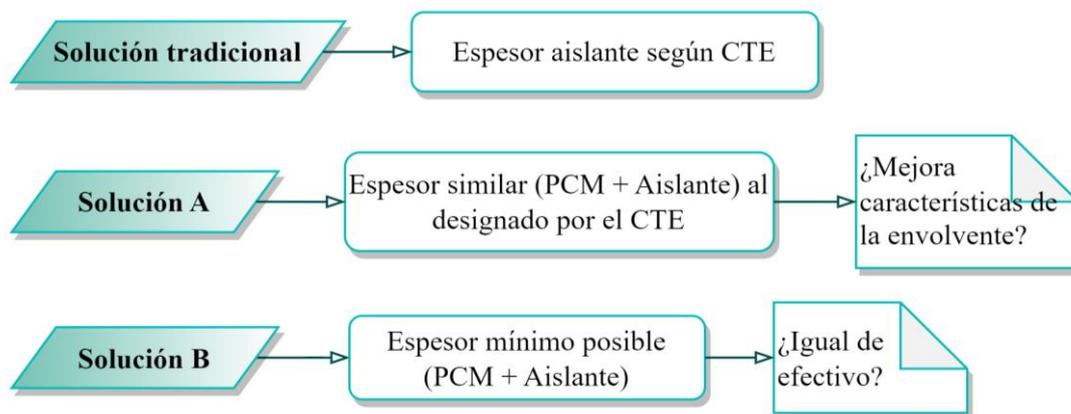
- Obtener el valor recomendado de espesor de aislante para una configuración de fachada y localización concreta, siguiendo la normativa del Código Técnico de la Edificación (CTE).
- Simular mediante un software de elementos finitos el comportamiento de una fachada convencional sometida al día tipo del mes más caluroso y del más frío de una localización concreta. Este será el caso de referencia con el que se compararán los resultados obtenidos en las envolventes adaptativas con PCM.
- Simular mediante un software de elementos finitos el comportamiento de fachadas activas con PCM, cuyo diseño se basa en añadir una o más capas de PCM al diseño tradicional.
- Estudiar el efecto de incorporar diferentes tipos de PCM a las fachadas activas, así como de la posición de la capa de PCM en la fachada.

- Optimizar el espesor de aislante en la configuración con PCM que tenga un mejor desempeño (menor oscilación interna de temperatura) para que la solución sea lo más compacta posible.

La validez de la aplicación de PCMs en la edificación quedará justificada si al introducir una capa de PCM complementaria a la capa de aislante convencional, el conjunto es capaz de amortiguar de manera más efectiva los cambios de temperatura que se producen en el exterior. Las propiedades físicas de estos materiales, principalmente su elevado calor latente, indican que pueden aportar a la envolvente una alta inercia térmica, difícil de conseguir sin recurrir a materiales de gran densidad y espesor, por lo que podrían conformar envolventes térmicas igual de efectivas con anchos de pared muy inferiores, con las ventajas en cuanto a habitabilidad que eso supone. De confirmarse su desempeño, se discutirá si es más interesante aprovechar el ahorro de espacio, o por el contrario si el mantener el espesor de pared original (en la medida que esto sea posible, ya que tanto el ancho de los aislantes como el del PCM viene en medidas comerciales) mejorando las características del cerramiento y conseguir, por tanto, un ahorro energético.

### 3. Metodología

El presente trabajo realiza un estudio comparativo entre una solución tradicional de envolvente, basada en el CTE, y dos soluciones activas con PCM. La “Solución A” intenta adecuar el espesor del conjunto PCM-Aislante, de manera que se acerque lo máximo posible al espesor recomendado por el CTE de cara a cumplir con los requerimientos de transmisividad del cerramiento. La “Solución B” busca reducir al máximo el ancho total de la envolvente usando el espesor mínimo de aislante convencional, que junto al PCM, mantenga unas condiciones de habitabilidad similares a la solución sin PCM. Se resumen las soluciones estudiadas en la Figura 13.



**Figura 13** Esquema de las diferentes configuraciones de fachada a estudiar

El estudio comparativo se llevó a cabo analizando la respuesta térmica de las fachadas tradicional y activas ante las condiciones climáticas reales de Valencia, obtenidas de la base de datos Meteonorm [13]. Para ello, se desarrollaron modelos matemáticos de las fachadas por el método de elementos finitos utilizando el software Ansys Student 2023. En concreto, el módulo denominado Ansys Workbench, que permite realizar numerosas simulaciones y análisis en diferentes campos (mecánico, electromagnetismo, fluidos, térmico...). El presente caso de estudio requiere cálculos térmicos no estacionarios, por lo que se empleó el submódulo Transient Thermal.

Los datos climáticos obtenidos de Meteonorm son la temperatura ambiente y la irradiación solar global sobre una superficie vertical orientada al sur. Estos se obtienen para todos los días de un año meteorológico tipo, calculados en base a registros anuales desde 2010, y para cada hora del día. Para cada mes, se obtuvo el día meteorológico promedio. Para el caso de Valencia, el día promedio más frío se da en enero, y el más caliente en agosto. Este día

promedio se reproduce de manera consecutiva 4 veces, de cara a asegurar la estabilización del sistema.

Para modelar el efecto de las condiciones climáticas se empleó el método de la temperatura sol-air. Este se basa en definir la temperatura equivalente que tendrá una fachada expuesta a unas determinadas condiciones de temperatura ambiente y radiación. La temperatura sol-air,  $T_{sol-air}$ , se define como [14]:

$$T_{sol-air}(t) = \frac{\alpha G(t)}{h} + T_{ext}(t) \quad 1)$$

donde  $\alpha$  es la absorptividad del material de la capa más exterior del cerramiento,  $G(t)$  es la irradiación solar a lo largo del día,  $h$  es el coeficiente de convección con el aire exterior, y  $T_{ext}(t)$  es la temperatura ambiente a lo largo del día. Se empleó un valor constante del coeficiente de convección exterior de  $25 \text{ W/m}^2\text{K}$ , de acuerdo con el Documento de Apoyo al Documento Básico de Ahorro de Energía del CTE (DA DB-HE/1) [15].

Los resultados obtenidos de cada una de las simulaciones se procesaron y representaron gráficamente utilizando el software Excel. Los datos obtenidos de las simulaciones no son relevantes de cara a valorar el rendimiento de cada una de las configuraciones, por lo que el uso de una hoja de Excel lo más automatizada posible es imprescindible para agilizar el proceso de volcado de datos de las numerosas simulaciones.

La comparativa entre las diferentes configuraciones se realiza fundamentalmente según 3 parámetros:

- Oscilación interna de temperatura. Diferencia entre la temperatura máxima y mínima de la superficie en contacto con el espacio habitable.
- Desfase de la onda térmica. Lapso de tiempo (en horas) que el cerramiento es capaz de retrasar el paso de la onda térmica exterior. Se calcula obteniendo el instante en que se alcanza la máxima temperatura en la cara exterior y restándolo del momento en que se registra la temperatura máxima en la superficie interior.
- Tiempo de respuesta. Tiempo (en horas) que tarda la superficie interna del cerramiento en alcanzar la temperatura de consigna interna desde un estado no climatizado. Para el caso Enero se parte de una temperatura de fachada de  $15 \text{ °C}$  y la

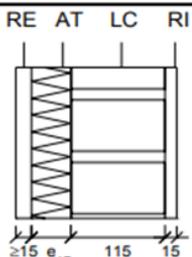
de consigna son 19 °C. Para agosto, la temperatura inicial son 30 °C y la de consigna 26 °C.

En todas las simulaciones se modelan 4 días consecutivos, siendo en las últimas 24 horas cuando se toman los datos y hacen las comparaciones, considerando que la solución se ha estabilizado por completo.

Para obtener imágenes realistas de las fachadas se utiliza el software de diseño 3D Autodesk Inventor 2023, únicamente como herramienta gráfica de diseño y visualización.

### 3.1.- CÁLCULO DEL ESPESOR DE AISLANTE

El punto de partida del estudio, sobre el que se realizarán todas las mediciones iniciales y las posteriores variantes con PCM, es una fachada vertical conformada por una fábrica de ladrillo macizo y una capa de aislante situada en la cara exterior. Esta configuración, aunque de manera simplificada, se asemeja constructivamente a una de las soluciones más utilizadas actualmente tanto en rehabilitación de fachadas como en nuevas construcciones, el SATE. Todos los detalles y características técnicas de esta fachada (espesores, materiales, propiedades físicas...) se obtienen del Catálogo de Elementos Constructivos que proporciona la web del Código Técnico de la Edificación [16]. Dentro de este catálogo, la configuración mencionada anteriormente es la F4.1, que pertenece a la categoría 4.2.4 “Fábrica con revestimiento continuo, sin cámara o con cámara de aire no ventilada, aislamiento por el exterior”.

Código	Sección (mm)	Datos entrada	HS	HE <sup>(1)</sup>
		RE	GI	U (W/m <sup>2</sup> K)
F 4.1		R1	4	1/(0,38+R <sub>AT</sub> )
		R3	5	

**Figura 14** Configuración de fachada a estudiar. Catálogo de elementos constructivos del CTE [16]

Como se puede observar en la Figura 14, en el catálogo se especifican todos los materiales, su orden de colocación y sus espesores, a excepción del material de aislamiento. Para facilitar su cálculo, se proporciona el dato de transmisividad ( $U$ ) del cerramiento con la siguiente expresión:

$$U = \frac{1}{(0,38 + R_{AT})} \quad 2)$$

donde  $R_{AT}$  es la resistencia térmica de la capa de aislante. De esta forma, se facilita la resistividad térmica del conjunto de materiales formado por el revestimiento exterior (RE), la fábrica de ladrillo cerámico (LC) y del revestimiento interior (RI), que resulta ser de  $0,38 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$ . Para obtener la resistencia del aislante se recurre a la ecuación de resistencia de una pared plana (ecuación 3), donde las variables son el espesor de dicho aislante ( $e$ ), su conductividad ( $k$ ) y la superficie de la pared ( $A$ ). Se establece un valor unitario de la superficie para trabajar con todas las variables en función de  $1 \text{ m}^2$ .

$$R_{AT} = \frac{e}{K \cdot A} \quad 3)$$

$$R_{AT} \equiv \frac{e}{K}$$

De cara a conocer la conductividad, es necesario determinar el aislante térmico a utilizar. Hay numerosas opciones en el mercado y el catálogo del CTE recoge los más utilizados: lana mineral, espuma de poliuretano (PUR), poliestireno expandido (EPS) y poliestireno extruido (XPS). Cada uno de ellos posee unas características concretas que lo hace más adecuado para según qué aplicación, climatología, zona del cerramiento... Para la fachada de estudio y la posición de la capa de aislante (por el exterior de la misma) interesa que tenga unas propiedades concretas para que su desempeño y vida útil sean los adecuados, ya que su exposición al ambiente exterior y a las inclemencias climáticas requiere que disponga de gran resistencia al agua. Es decir, se busca que sea lo más hidrófobo posible y que además posea una adecuada resistencia mecánica para soportar las cargas e impactos a los que pueda estar sometido en el exterior (viento, lluvia, ...). En la Tabla 1 quedan recogidas las propiedades más comunes para estos aislantes. Hay que tener en cuenta que estas varían en función del fabricante e incluso puede haber variaciones entre diferentes modelos para un mismo aislante. Por ello, se utilizan los datos de un fabricante de material aislante en

particular, Soprema. El material que cumple todos los requisitos citados anteriormente es el XPS, teniendo además el valor de conductividad térmica más bajo de entre todos ellos.

	Lana Mineral	PUR	EPS	XPS
<b>Conductividad (W/mK)</b>	0.032 - 0.044	0.020 - 0.030	0.030 - 0.040	0.028 - 0.035
<b>Resistencia al agua</b>	Buena	Sensible	Sensible	Buena
<b>Resistencia compresión</b>	Baja	Alta	Baja	Alta
<b>Resistencia al fuego</b>	Alta	Media - Alta	Baja - Media	Alta
<b>Densidad (kg/m3)</b>	20 - 200	20 - 40	15 - 35	28 - 45
<b>Coste</b>	Moderado	Moderado- Alto	Bajo- Moderado	Moderado - Alto

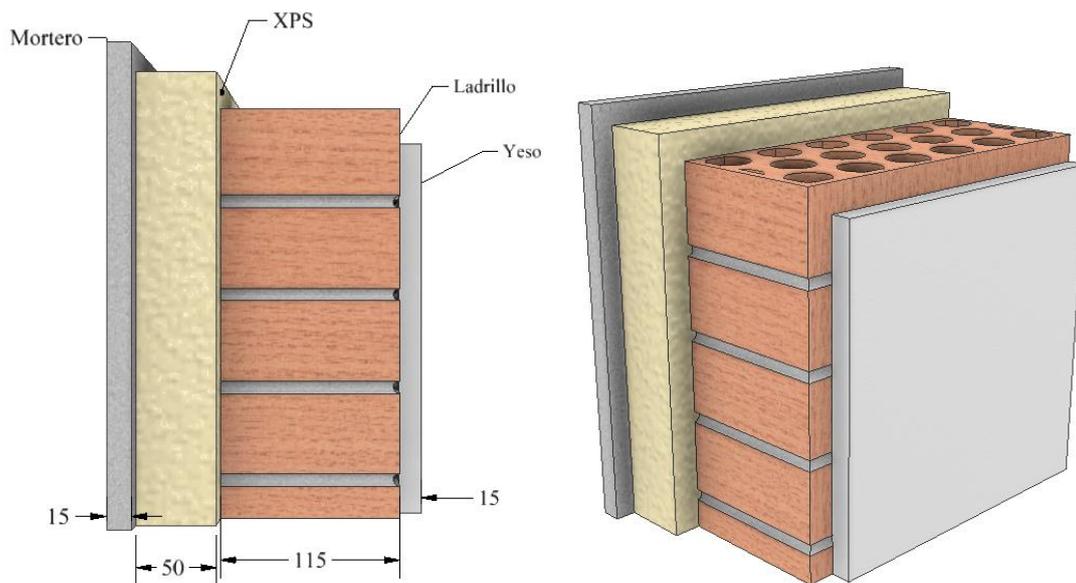
**Tabla 1** Propiedades más comunes de los aislantes térmicos

Se escoge por lo tanto el XPS como material aislante tanto para la configuración inicial como para las dos soluciones con PCM. El fabricante Soprema posee diferentes modelos de aislante XPS para diferentes localizaciones de la envolvente (cubiertas, suelos, fachadas...) y diferentes métodos de fijación. Se escogió el designado comercialmente como *Sopra XPS CB* [17], pensado específicamente para ser utilizado en fachadas verticales en configuración SATE. De su ficha técnica se obtuvieron los valores de conductividad y los diferentes espesores disponibles. Este material no presenta una conductividad constante, sino que hay un ligero aumento de la misma para los mayores espesores. De todas formas, los espesores con los que se trabaja caen dentro de un mismo rango (40-80 mm), luego el valor de conductividad para el material aislante será de 0,033 W/m K. Conociendo el valor de conductividad del aislante, la ecuación 2) quedaría de la siguiente forma:

$$U = \frac{1}{(0,38 + \frac{e}{0,033})} \quad 4)$$

El valor de transmisividad límite para cada elemento del cerramiento viene determinado por el DA-DB/HE 1 [15], en función de la ubicación y altitud sobre el nivel del mar en la que se encuentra la edificación. Para el caso de estudio, la localización del proyecto es Valencia y su altitud está en el rango de 0 a 50 m, por lo que accediendo a la Tabla a-Anejo B (Zonas climáticas) se obtiene que se trata la zona climática B. Para dicha zona climática, se accede a la tabla 3.1.1.a-HE1, en la que se obtiene el valor límite de transmitancia para un muro

vertical perteneciente a la envolvente térmica de  $0,56 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Despejando de la ecuación 4), se obtiene un valor de espesor de aislante de 46,39 mm, por lo que se escogió la medida comercial inmediatamente superior, es decir, 50 mm. La Figura 15 es una representación realista y proporcionada de la configuración de fachada tradicional, en la que se especifican sus materiales y los espesores de los mismos. Las propiedades de dichos materiales se desglosarán en el capítulo siguiente de modelos numéricos.



**Figura 15** Configuración de fachada tradicional con sus materiales y espesores (mm). Código 4.1 según CTE

## 4. Modelos numéricos y resultados

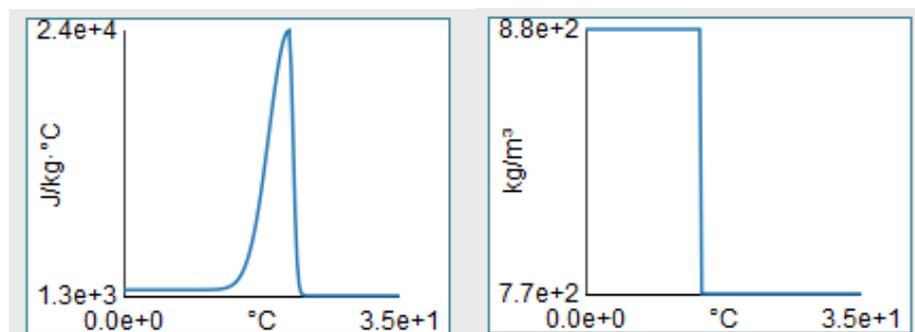
Se utilizaron modelos numéricos bidimensionales (2D) para las simulaciones por elementos finitos, recurriendo al módulo Workbench del software Ansys Academic 2023. Se realizaron simulaciones térmicas dinámicas de cada una de las soluciones de envolvente, considerando las diferentes condiciones de contorno correspondientes al clima de Valencia para el día típico más frío y para el más caluroso.

Los aspectos comunes a todos los modelos numéricos son:

- **Modelización del PCM.** Se trabajó con una marca comercial de PCMs, del fabricante Rubitherm, de formato macroencapsulado en paneles rectangulares de aluminio. El espesor del aluminio es de 0,5 mm, y el espesor total del panel, con un espesor total de 10 mm (Figura 16). La obtención de las propiedades de los paneles de PCM se realizó previamente por el grupo de investigación GICONSIME de la Universidad de Oviedo. Para el modelado del proceso de cambio de fase, se utilizó el método de la capacidad térmica efectiva. Este consiste combinar el calor sensible y el latente en una única propiedad, la capacidad térmica efectiva, de modo que se modela el PCM como un sólido cuyo calor específico aumenta mucho cuando su temperatura está dentro del rango de cambio de fase [18]. Para este modelo, las propiedades más relevantes para las simulaciones térmicas dinámicas son:
  - Capacidad térmica efectiva y densidad. Estas propiedades son dependientes de la temperatura, ya que dependen de si el PCM es sólido, líquido, o está en proceso de cambio de fase. En la Figura 17 se muestra un ejemplo de estas propiedades una vez introducidas en el software de simulación.
  - Conductividad térmica del panel. Esta propiedad es constante con la temperatura, ya que no depende del estado del PCM, y tiene un valor de  $0,2 \text{ W/m K}$  para todos los PCMs estudiados.



**Figura 16** PCM macroencapsulado del fabricante Rubitherm

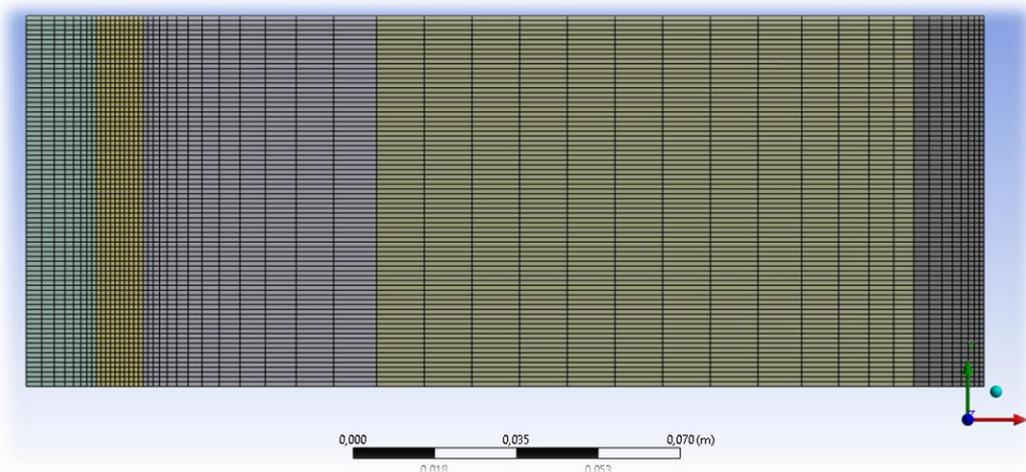


**Figura 17** Curvas de Cp y densidad del PCM Rubitherm

Las curvas de capacidad térmica efectiva y densidad de la Figura 17 están calculadas para un material de PCM en particular, cuyo cambio de fase tiene lugar en un rango de temperaturas concreto. El fabricante suministra PCMs que cambien de fase a distintas temperaturas, de manera que sea posible escoger el que se adecúe mejor a la aplicación. En las simulaciones, por tanto, se varió el PCM incorporado a la fachada para determinar cuál responde de manera más efectiva a las condiciones de contorno establecidas. Inicialmente se analizaron tres tipos, nombrados según la temperatura en la que la capacidad efectiva alcanza su valor máximo:

- PCM RT15
  - PCM RT21
  - PCM RT27
- **Modelo de elementos finitos.** El dominio de simulación se discretizó con elementos finitos de tipo PLANE293. Este es un elemento de orden superior y 8 nodos, que presenta un único grado de libertad por nodo, la temperatura. Resulta un elemento finito óptimo para análisis térmicos 2D estacionarios y transitorios. Se realizó un refinado de malla en la zona del PCM para garantizar que la macrocápsula se modela de manera precisa, asegurando un número suficiente de puntos de cálculo. De la misma manera, la cara en

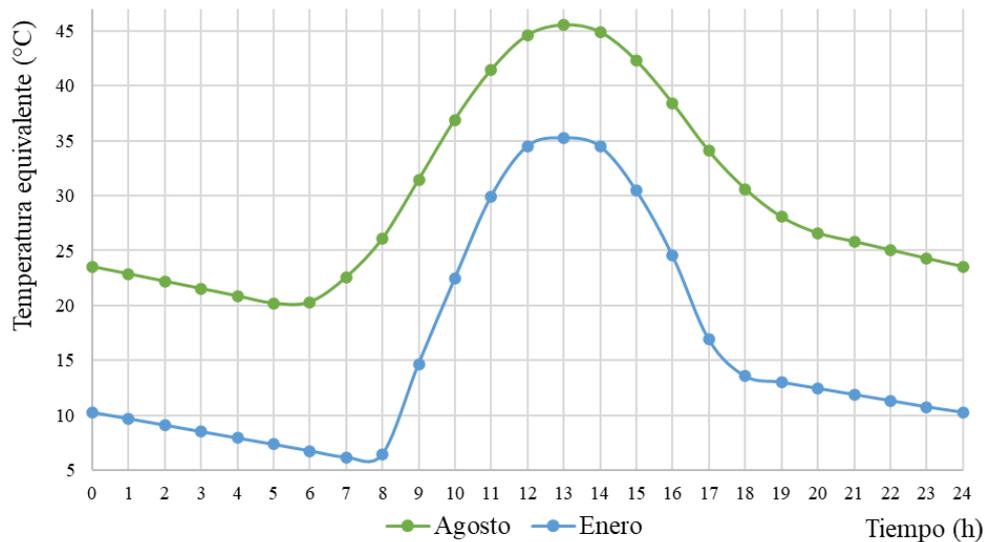
contacto con el espacio interior debe tener un tamaño de elemento lo suficientemente pequeño para que se pueda calcular de manera precisa el fenómeno de convección que se impone de condición de contorno en dicha cara. En la Figura 18 se aprecia el mallado de una geometría de fachada activa, con el mencionado refinamiento de malla en el PCM (segundo por la izquierda) y en la pared interior (extremo derecho).



**Figura 18** Mallado de fachada activa (PCM por el exterior)

- **Condiciones de contorno:**

- Las superficies superior e inferior se consideren adiabáticas, por estar en un modelo de flujo unidireccional, debido a las grandes alturas de las envolventes en comparación a su espesor.
- En la cara exterior de la fachada se emplea una condición de temperatura, estableciendo la temperatura equivalente para el día promedio más frío (enero) y más cálido (agosto) (Figura 19).



**Figura 19** Temperatura equivalente del día promedio más frío y más cálido

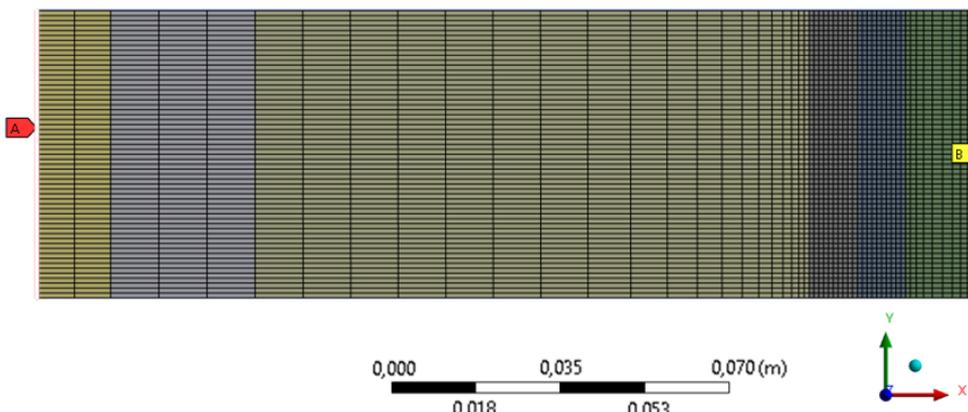
- En la cara interior de la fachada se estableció una condición de convección (Figura 20), utilizando elementos tipos SURF151. Este elemento se puede aplicar en análisis térmicos 2D que incluyan efectos como convección y radiación. Para modelar las condiciones de confort interior, se utilizó una temperatura del aire interior de 20 °C en enero y 25 °C en agosto. Estas temperaturas, así como el coeficiente de convección interior de valor 7,692  $W/m^2K$ , se toman del documento de apoyo DA DB-HE [15].

**A: 4.1 - PCM**

Transient Thermal

**A** Temperature: 10,26 °C

**B** Convection 2: 20, °C, 7,69  $W/m^2 \cdot ^\circ C$



**Figura 20** Condiciones de contorno del modelo. Temperatura dinámica exterior (A) y convección interior (B)

- **Discretización temporal.** Para cada fachada estudiada, se simularon 4 días. Es decir, se repitió 4 veces la condición de contorno de temperatura en la superficie exterior. Esto fue necesario para lograr la estabilización térmica de las fachadas. Por lo tanto, el tiempo simulado fue de 96 h.

#### 4.1.- SOLUCIÓN TRADICIONAL

Se modeló inicialmente la solución tradicional para obtener el caso de referencia, con el cual se compararán los resultados de las dos soluciones adaptativas.

- **Propiedades de los materiales.** Todos los materiales utilizados en la configuración tradicional (Figura 15) son comunes al resto de soluciones, siendo las propiedades más relevantes para los cálculos térmicos dinámicos las presentados en la Tabla 2.

Material	Cp (J/kgK)	Conductividad (W/mK)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )
Mortero	1000	1,3	1900
Aislante XPS	1210	0,033	55
Ladrillo macizo	1000	0,85	2300
Yeso	1000	0,57	1300

**Tabla 2** Propiedades físicas de los materiales comunes a todas las fachadas

En la Tabla 3 se muestran los resultados obtenidos de los 2 casos de estudio de esta fachada.

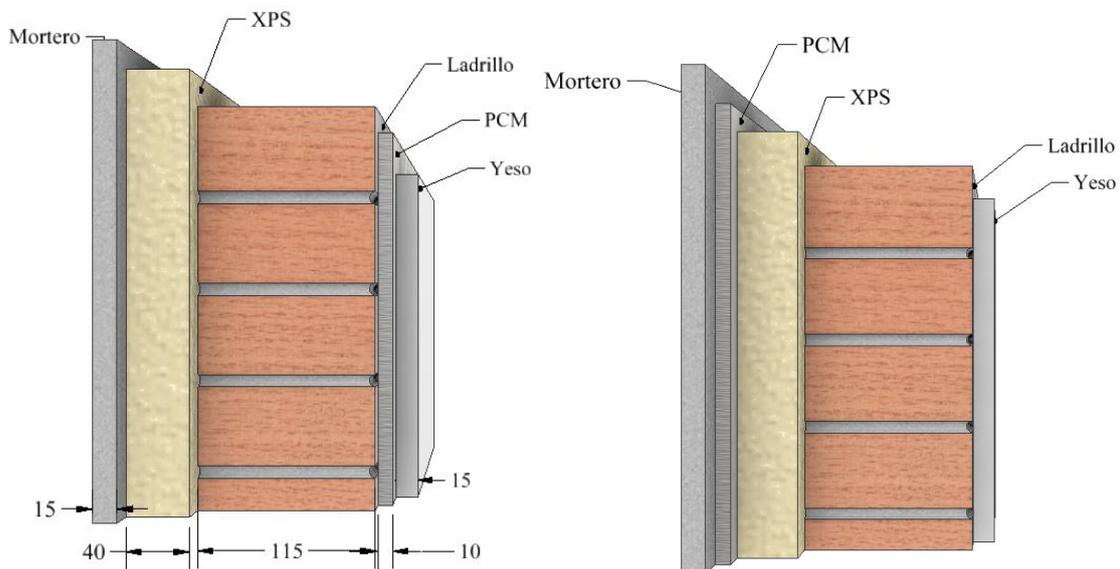
Mes	Oscilación interna (°C)	Amortiguación (%)	Desfase onda térmica (h)
Enero	0,475	98,36	6
Agosto	0,437	98,27	6

**Tabla 3** Resultados fachada tradicional. Código 4.1 según CTE

Por ser esta configuración de fachada una solución normativa, calculada según las recomendaciones del CTE, es capaz de amortiguar de manera muy efectiva las oscilaciones de temperatura externas, que para ambas situaciones superan el 98%. Sin embargo, por tratarse de una solución de poco espesor y del uso de materiales con baja densidad y calor específico, tiene una baja inercia térmica, puesto que el desfase temporal de la onda térmica se aleja bastante del ideal de 12 horas, en el que no se produce solapamiento alguno entre la radiación solar externa y las temperaturas máximas internas [12].

## 4.2.- SOLUCIÓN A

Se trata de la fachada adaptativa de espesor idéntico al cerramiento tradicional. Se simularon 3 tipos de PCM (RT15, RT24, RT27), en 2 posiciones diferentes de la envolvente (exterior e interior), para las condiciones climáticas de enero y de agosto. En la Figura 21 se pueden ver los nuevos espesores del cerramiento, reduciéndose el espesor del aislante a un valor comercial más pequeño (40 mm), de manera que la introducción del PCM (10 mm de espesor) no suponga un aumento del espesor total de la fachada. Se representan también las 2 posiciones del PCM, una situada más hacia el exterior y otra más cerca del espacio habitable.



**Figura 21** Solución A. PCM interior (izquierda) y PCM exterior (derecha)

En la Tabla 4 y Tabla 5 se muestran los 12 caso de estudio, 6 para la situación climática de enero y 6 para agosto.

Posición	PCM	Oscilación interna (°C)	Mejora	Desfase (h)
PCM exterior	RT15	0,549	-15,58%	6
	RT21	0,559	-17,68%	6
	RT27	0,563	-18,53%	6
PCM interior	RT15	0,469	1,26%	6
	RT21	0,312	34,32%	8
	RT27	0,461	2,95%	6

**Tabla 4** Resultados Solución A para enero

Posición	PCM	Oscilación interna (°C)	Mejora	Desfase (h)
PCM exterior	RT15	0,522	-19,45%	6
	RT21	0,521	-19,22%	6
	RT27	0,51	-16,70%	6
PCM interior	RT15	0,435	0,46%	6
	RT21	0,435	0,46%	6
	RT27	0,299	31,58%	8

**Tabla 5** Resultados solución A para agosto

En ambas condiciones climáticas la solución de PCM en posición interior consigue resultados de oscilación interna más bajos que en la posición exterior. Esto se debe a que, en la posición exterior, la energía acumulada por el PCM no se cede al espacio interior cuando baja la temperatura en el exterior por el efecto del aislante. Por ello, es muy difícil que el PCM en esta posición contribuya a reducir la oscilación interna de temperatura en ninguna de las situaciones analizadas.

En ambas condiciones climáticas hay un PCM que consigue reducir de manera considerable la oscilación interna de temperatura (>30%) y además aumentar el desfase temporal de la onda térmica hasta las 8 horas. Sin embargo, no es el mismo para la dos, por lo que no se podría optar por un único PCM que sirviese para la situación Enero y para la de Agosto.

Por esta razón se optó por juntar los 2 tipos de PCM que mejoran notablemente la respuesta térmica de la envolvente. Así se incorpora el RT21, adecuado para la situación climática de enero y el RT27, adecuado para contribuir en agosto. Se debe estudiar un nuevo modelo que sustituya al material aislante tradicional por una doble capa de PCMs distintos, que den solución al rango de temperaturas anuales (solución A2). En esta solución se evalúa si siguen siendo igual de efectivos los PCMs al trabajar en la misma envolvente, así como el orden adecuado de colocación.

#### 4.2.1.- Solución A2

Se trata de una fachada adaptativa con dos capas de diferente PCM en la posición interna. Se simularon dos disposiciones distintas para cada situación climática: RT27+RT21 y RT21+RT27. Para mantener el mismo espesor total de cerramiento que en la situación tradicional se debe reducir el espesor de aislante hasta los 30 mm.

En la Tabla 6 y Tabla 7 Tabla 5 se muestran los resultados obtenidos de los 4 casos de estudio.

Posición	PCMs	Oscilación interna (°C)	Mejora	Desfase (h)
PCM interior	RT27-RT21	0,324	31,79%	9
	RT21-RT27	0,326	31,37%	8

**Tabla 6** Resultados solución A2 para enero

Posición	PCMs	Oscilación interna (°C)	Mejora	Desfase (h)
PCM interior	RT27-RT21	0,308	29,52%	9
	RT21-RT27	0,313	28,38%	9

**Tabla 7** Resultados solución A2 para agosto

El orden de PCMs que trabaja de manera más efectiva en ambas situaciones climáticas es el RT27-RT21 (orden de exterior a interior), siendo capaz de disminuir la oscilación de temperatura interna en un 30% aproximadamente, con respecto a la fachada no adaptativa. El desfase de la onda térmica se extiende hasta las 9 horas con esta combinación de PCMs, mejorando en 3 horas el desfase producido por la solución tradicional y quedándose cerca de los valores recomendados para una óptima inercia térmica.

#### 4.2.2.- Comparativa entre las soluciones A y A2

En la Tabla 8 y Tabla 9 se presenta una comparativa de los parámetros característicos de ambas soluciones, incluyendo el cálculo del tiempo de respuesta. Este es el tiempo en alcanzar la temperatura de consigna, que es siempre menor para la solución tradicional por presentar menor inercia térmica. En función del uso puede ser un aspecto positivo o negativo. Para espacios de uso no continuado, como pueden ser oficinas, colegios, viviendas vacacionales... resulta un aspecto negativo por necesitar un gran tiempo para alcanzar el confort térmico. Sin embargo, para edificios de uso continuado, son más recomendables tiempos grandes de respuesta, ya que se persigue que el espacio se mantenga dentro de las temperaturas de confort sin requerir aporte energético (calefacción o refrigeración).

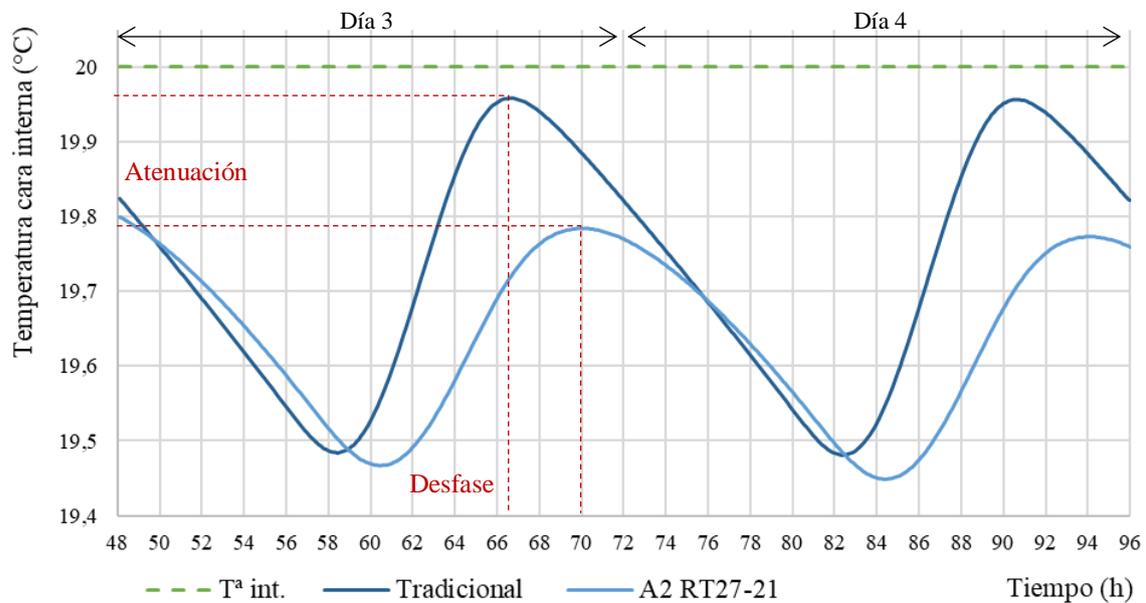
Configuración	Espesor (mm)	Oscilación int. (°C)	Desfase (h)	Tiempo respuesta (h)
Tradicional	195	0,475	6	17
A2 RT27-RT21	195	0,324	9	21

**Tabla 8** Comparativa resultados solución tradicional y A2 RT27-RT21 para enero

Configuración	Espesor (mm)	Oscilación int. (°C)	Desfase (h)	Tiempo respuesta (h)
Tradicional	195	0,437	6	23
A2 RT27-RT21	195	0,308	9	30

**Tabla 9** Comparativa resultados solución tradicional y A2 RT27-RT21 para agosto

Se toma como configuración óptima la solución A2 RT27-RT21, ya que manteniendo el mismo espesor que la configuración tradicional (195 mm), mejora su comportamiento en términos de oscilación de temperatura y de inercia térmica. En la Figura 22 se representa la oscilación interna en las últimas 48 horas de las soluciones tradicional y de la A2 RT27-RT21 para la situación climática de enero (temperatura de consigna interior de 20 °C). Se puede apreciar tanto el amortiguamiento de la onda térmica como el desfase temporal que produce la solución activa.



**Figura 22** Oscilación interna de temperatura en fachada tradicional y en A2 RT27-21

### 4.3.- SOLUCIÓN B

La solución B es la fachada adaptativa optimizada para conseguir un espesor total de cerramiento mínimo, manteniendo el mismo nivel de amortiguación térmica que la solución tradicional (misma oscilación de temperatura en la cara interna). Se simuló la configuración de fachada A2 RT27-RT21, disminuyendo de manera progresiva el espesor de aislante (de 10 en 10 mm) hasta que la oscilación de temperatura interna fuese lo más parecida posible a la de la configuración tradicional.

Se redujo el espesor de aislamiento en una ocasión, disminuyendo este hasta los 20 mm.

Configuración	Oscilación int. (°C)	Espesor (mm)	Desfase (h)	Tiempo respuesta (h)
Tradicional	0,475	195	6	17
A2 RT27-RT21 opt.	0,48	185	9	19

**Tabla 10** Comparativa resultados solución tradicional y A2 RT27-RT21 optimizada para enero

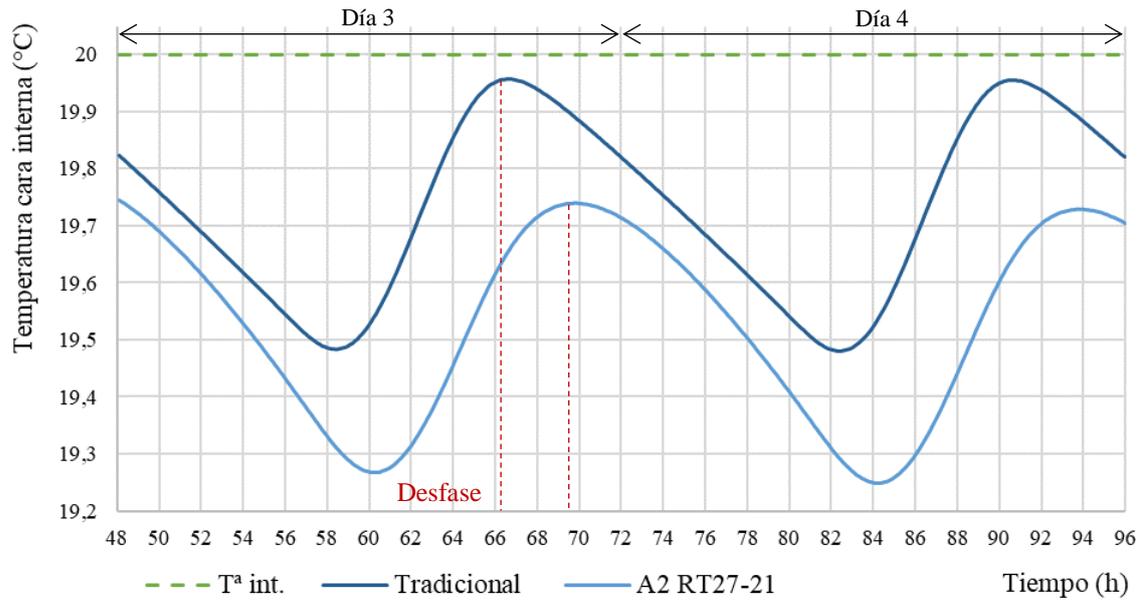
Configuración	Oscilación int. (°C)	Espesor (mm)	Desfase (h)	Tiempo respuesta (h)
Tradicional	0,437	195	6	23
A2 RT27-RT21 opt.	0,436	185	9	30

**Tabla 11** Comparativa resultados solución tradicional y A2 RT27-RT21 optimizada para agosto

En la Tabla 10 y Tabla 11 se presenta una comparativa entre los parámetros más relevantes de la configuración tradicional y de la solución adaptativa, esta vez optimizada con un espesor de aislante de 20 mm. Para ambas situaciones climáticas es posible reducir el espesor total de fachada hasta los 185 mm, consiguiendo oscilaciones térmicas en la superficie interna prácticamente idénticas a la configuración tradicional y conservando la mejora en desfase de la onda térmica. Los tiempos de respuesta se mantienen prácticamente iguales.

#### 4.3.1.- Comparativa entre las soluciones B y A2

Para comparar su comportamiento dinámico frente a la solución A2 RT27-RT21 no optimizada, se recurrió a una representación de la onda térmica interna (Figura 23) para las últimas 48 horas de las soluciones tradicional y de la A2 RT27-RT21 optimizada (situación climática de enero). En este caso, únicamente se aprecia el desfase temporal producido por la solución activa, puesto que la oscilación interna de temperaturas es idéntica en ambas soluciones.



**Figura 23** Oscilación interna de temperatura en fachada tradicional y en A2 RT27-21 optimizada

## 5. Conclusiones

El presente Trabajo Fin de Grado ha tenido como objeto analizar el comportamiento de cerramientos que incorporan materiales de cambio de fase macroencapsulados mediante el uso de modelos de elementos finitos. Para ello, se realizaron simulaciones térmicas dinámicas que permitiesen comprender la interacción entre los PCMs y los elementos constructivos de una fachada tradicional, bajo la acción de unas condiciones climáticas reales. De estas simulaciones se obtuvieron las siguientes conclusiones y recomendaciones para la incorporación de este tipo de materiales en los cerramientos de edificios habitables:

- **Tipo de PCM.** La elección del PCM, es decir, el rango de temperaturas en las que se produce su cambio de fase, es un factor clave en el diseño de envolventes adaptativas. De no ser el adecuado al clima y las condiciones en las que se van a utilizar, no se producirá el cambio de fase y, por lo tanto, no se aprovechará el calor latente, responsable del aumento de la inercia térmica. En tal caso, la incorporación de PCMs a la envolvente no mejoraría el cerramiento en términos de inercia térmica y confort, y podría llegar incluso a empeorarla.
- **Posición en la envolvente.** En relación con el punto anterior, para que el PCM realice el proceso de cambio de fase, debe situarse en zonas concretas de la envolvente. Para los casos de estudio de este trabajo, la posición óptima se encuentra lo más cerca posible de la zona habitable. Este resultado concuerda con la bibliografía consultada, que expone que los elementos de inercia térmica deben estar en posiciones internas del cerramiento.
- **Temperatura interior.** Puesto que el PCM se sitúa cerca del espacio habitable, la temperatura de consigna interna marcará en gran medida qué tipo de PCM se debe utilizar. Teniendo en cuenta que las temperaturas de confort internas varían según la estación del año (20 °C en invierno y 25 °C en verano), se recurrió a la combinación de 2 tipos de PCMs (RT27 + RT21), de manera que el RT27 trabaja especialmente en las condiciones climáticas de verano y el RT21 en las de invierno. En caso de variar significativamente las condiciones de temperatura interior, sería necesario analizar de nuevo la eficiencia de la solución optimizada verificando que los PCMs siguen contribuyendo a través de su proceso de cambio de fase a mejorar la respuesta térmica de la envolvente.

Si los puntos mencionados anteriormente se cumplen, la incorporación de PCMs macroencapsulados mejora de manera sustancial la respuesta térmica de las envolventes. Esto se debe a la acumulación de calor latente, que supone un aumento de la inercia térmica sin tener que recurrir a grandes espesores de pared (acumulación tradicional en forma de calor sensible). Este aumento en la inercia térmica repercute de manera positiva, estabilizando las temperaturas internas y aumentando por tanto el confort térmico interior, a menor oscilación, mayor confort. Además, se retrasa la entrada de la onda térmica exterior, situándola en periodos en los que no afecte negativamente a las condiciones internas.

En las simulaciones realizadas ha sido posible aumentar la inercia térmica del cerramiento, medida en términos de desfase temporal de la onda térmica, consiguiendo menores oscilaciones en la temperatura interior. Esta solución se propone manteniendo el mismo espesor de pared que una solución tradicional para poder comparar la respuesta térmica de las soluciones propuestas. Además, se logró una solución optimizada que, reduciendo la capa de aislante y por tanto del espesor total de fachada, mantiene las ganancias en inercia térmica, sin aumentar la fluctuación de temperatura interna, y por tanto conservando el confort térmico en el interior.

Esta solución de envolvente es aún un sistema en fase de estudio, pero presenta un gran potencial para abordar soluciones de envolventes adaptativas, cuya respuesta térmica varíe en función de las condiciones climáticas a las que están expuestas. Así, se consiguen envolventes cuyo comportamiento térmico es dinámico y varía en el tiempo, al igual que lo hace la climatología. Son soluciones eficientes, ligeras y sostenibles, puesto que muchos de los PCMs que existen en el mercado son bio-based (de origen biológico). Este trabajo constituye una modesta aportación para abordar el gran reto tecnológico que supone el mejorar la sostenibilidad de los edificios del futuro, reduciendo su consumo energético mediante la mejora de las envolventes. Las soluciones de envolventes adaptativas no se plantean únicamente como una opción eficiente en obra nueva, sino que presentan un gran potencial en la rehabilitación energética de edificios, donde la ligereza de la solución y la reducción de espesores son aspectos clave.

Finalmente, se ha comprobado que la modelización numérica, en este caso empleando el método de los elementos finitos, es una herramienta muy útil para el estudio de soluciones singulares en modo transitorio, cuya caracterización experimental sería inabordable para un

trabajo de estas características. Los modelos numéricos permiten hacer un análisis fiable del comportamiento de las envolventes adaptativas con PCMs y son perfectamente válidos para analizar su comportamiento con otros tipos de materiales de cambio de fase (siempre que se conozcan sus propiedades y comportamiento), con otras condiciones climáticas o con otras temperaturas internas. Son, por tanto, una herramienta matemática de gran utilidad para el análisis de envolventes adaptativas con PCMs.

## 6. Bibliografía

- [1] «¿Qué es el cambio climático? | Naciones Unidas». Accedido: 7 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.un.org/es/climatechange/what-is-climate-change>
- [2] «Emisiones de gases de efecto invernadero por país y sector (infografía) | Noticias | Parlamento Europeo». Accedido: 30 de marzo de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.europarl.europa.eu/news/es/headlines/society/20180301STO98928/emisiones-de-gases-de-efecto-invernadero-por-pais-y-sector-infografia>
- [3] «Eurostat :Energy flow diagrams». Accedido: 30 de marzo de 2023. [En línea]. Disponible en: [https://ec.europa.eu/eurostat/cache/sankey/energy/sankey.html?geos=EU27\\_2020&year=2019&unit=KTOE&fuels=TOTAL&highlight=\\_&nodeDisagg=11111111111111&flowDisagg=true&translateX=-490&translateY=85&scale=1&language=EN](https://ec.europa.eu/eurostat/cache/sankey/energy/sankey.html?geos=EU27_2020&year=2019&unit=KTOE&fuels=TOTAL&highlight=_&nodeDisagg=11111111111111&flowDisagg=true&translateX=-490&translateY=85&scale=1&language=EN)
- [4] «Eurostat: Energy Balances». Accedido: 28 de febrero de 2023. [En línea]. Disponible en: [https://ec.europa.eu/eurostat/cache/infographs/energy\\_balances/enbal.html?geo=EU27\\_2020&unit=KTOE&language=EN&year=2019&fuel=fuelMainFuel&siec=TOTAL&details=0&chartOptions=0&stacking=normal&chartBal=FC\\_OTH\\_CP\\_E&chart=pieChart&full=1&chartBalText=&order=DESC&siecs=TOTAL,C0000X0350-0370,C0350-0370,E7000,S2000,G3000,H8000,N900H,O4000XBIO,P1000,RA000,W6100\\_6220&dataset=nrg\\_bal\\_s&decimals=0&agregates=0&fuelList=fuelElectricity,fuelCombustible,fuelNonCombustible,fuelOtherPetroleum,fuelMainPetroleum,fuelOil,fuelOtherFossil,fuelFossil,fuelCoal,fuelMainFuel](https://ec.europa.eu/eurostat/cache/infographs/energy_balances/enbal.html?geo=EU27_2020&unit=KTOE&language=EN&year=2019&fuel=fuelMainFuel&siec=TOTAL&details=0&chartOptions=0&stacking=normal&chartBal=FC_OTH_CP_E&chart=pieChart&full=1&chartBalText=&order=DESC&siecs=TOTAL,C0000X0350-0370,C0350-0370,E7000,S2000,G3000,H8000,N900H,O4000XBIO,P1000,RA000,W6100_6220&dataset=nrg_bal_s&decimals=0&agregates=0&fuelList=fuelElectricity,fuelCombustible,fuelNonCombustible,fuelOtherPetroleum,fuelMainPetroleum,fuelOil,fuelOtherFossil,fuelFossil,fuelCoal,fuelMainFuel)
- [5] «Energy consumption in households - Statistics Explained». Accedido: 4 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/-/ddn-20220617-1>
- [6] Eurostat, IDAE, y E. y T. Ministerio de Industria, «Consumos del Sector Residencial en España». Accedido: 7 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en:

[https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos\\_Informe\\_SPAHOUSEC\\_AC\\_C\\_f68291a3.pdf](https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_Informe_SPAHOUSEC_AC_C_f68291a3.pdf)

- [7] «El parque de viviendas en España envejece: una de cada dos casas tiene más de 40 años — idealista/news». Accedido: 19 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.idealista.com/news/inmobiliario/vivienda/2021/09/21/792446-el-parque-de-viviendas-envejece-una-de-cada-dos-casas-tiene-mas-de-40-anos>
- [8] IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía), «Calificación de la eficiencia energética de los edificios». Accedido: 19 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.idae.es/tecnologias/eficiencia-energetica/edificacion/calificacion-energetica-de-edificios>
- [9] «Descarbonización en la Rehabilitación». Accedido: 24 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://es.knaufinsulation.com/es/descarbonizacion-en-la-rehabilitacion>
- [10] A. Oliver, F. J. Neila, y A. García-Santos, «Clasificación y selección de materiales de cambio de fase según sus características para su aplicación en sistemas de almacenamiento de energía térmica », doi: 10.3989/mc.2012.58010.
- [11] Boeing Company y LRV Systems Engineering, «Lunar Rover Operations Handbook 1971». Accedido: 8 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.nasa.gov/history/alsj/lrvhand.html>
- [12] IECA (Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones) y ASA (Asociación Sostenibilidad y Arquitectura), «Manual de aplicación de la inercia térmica | ACTIVATIE | Plataforma formación y servicios técnicos edificación», Accedido: 8 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.activatie.org/publicacion?1020-Manual-de-aplicaci%C3%B3n-de-la-inercia-t%C3%A9rmica>
- [13] Meteotest AG, «Meteonorm». Berna. Accedido: 2 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://meteonorm.com/en/>

- [14] P. W. O'Callaghan y S. D. Probert, «Sol-air temperature», *Appl Energy*, vol. 3, n.º 4, pp. 307-311, oct. 1977, doi: 10.1016/0306-2619(77)90017-4.
- [15] Ministerio de Transportes Movilidad y Agenda Urbana, «Documento Básico de Ahorro de Energía 1. Cálculo de parámetros característicos de la envolvente (DA DB-HE / 1).», en *Código Técnico de la Edificación*, 2020. Accedido: 21 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.codigotecnico.org/DocumentosCTE/AhorroEnergia.html>
- [16] Instituto Eduardo Torroja de ciencias de la construcción con la colaboración de CEPCO y AICIA, «CATÁLOGO DE ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS DEL CTE», Accedido: 15 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.codigotecnico.org/Programas/CatalogoElementosConstructivos.html>
- [17] «SOPRA XPS CB - Soprema». Accedido: 28 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.soprema.es/es/product/aislamiento-termico/xps/xps-cb>
- [18] M. Alvarez-Rodriguez, M. Alonso-Martinez, I. Suarez-Ramon, y P. José García-Nieto, «Numerical model for determining the effective heat capacity of macroencapsulated PCM for building applications», *Appl Therm Eng*, vol. 242, p. 122478, abr. 2024, doi: 10.1016/J.APPLTHERMALENG.2024.122478.