



Universidad de  
Oviedo



# **ESCUELA POLITÉCNICA DE INGENIERÍA DE GIJÓN.**

## **GRADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES**

### **ÁREA DE CONSTRUCCIÓN**

#### **MEJORA DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE EDIFICIOS MEDIANTE EL USO DE FACHADAS ACTIVAS CON MATERIALES DE CAMBIO DE FASE: ANÁLISIS TÉRMICO**

**D. CUETOS NÚÑEZ, Paula**  
**TUTOR: D<sup>a</sup>. ALONSO MARTÍNEZ, Mar**  
**D.ÁLVAREZ RODRÍGUEZ, Matías**

**FECHA: Febrero 2025**

## ÍNDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>6</b>
<b>2. ANTECEDENTES .....</b>	<b>8</b>
2.1.- MATERIALES DE CAMBIO DE FASE .....	8
<b>3. OBJETIVOS .....</b>	<b>13</b>
<b>4. METODOLOGÍA.....</b>	<b>15</b>
4.1.- PARÁMETROS Y PROCESO PARA LA EVALUACIÓN TÉRMICA .....	16
<b>5. MODELO NUMÉRICO .....</b>	<b>19</b>
<b>6. RESULTADOS .....</b>	<b>28</b>
6.1.- SOLUCIÓN TRADICIONAL.....	28
6.2.- SOLUCIÓN 1.....	31
6.3.- SOLUCIÓN 2.....	35
<b>7. CONCLUSIONES .....</b>	<b>37</b>
<b>8. REFERENCIAS .....</b>	<b>39</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.- Diferencia entre calor latente y sensible [5]. .....	8
Figura 2.- Comportamiento del PCM durante su transición a estados sólidos y líquidos [6]. .....	9
Figura 3.- Efecto de la inercia térmica [9]. .....	10
Figura 4.- Propiedades tipos de PCM [14]. .....	11
Figura 5.- Fachada tradicional con sus respectivos materiales.....	15
Figura 6.-Fachada con PCM, “Solución 1.A” (izquierda) y “Solución 1.B” (derecha) .....	16
Figura 7.- Geometría fachada tradicional .....	19
Figura 8.-Fachada “Solución 1.A” (izquierda) y fachada “Solución 1.B” (derecha).....	20
Figura 9.- Geometría de las configuraciones de fachadas a simular en Ansys ® .....	21
Figura 10.- Capacidad efectiva equivalente para los PCMs utilizados. ....	22
Figura 11.- Curvas de densidad de los PCMs utilizados .....	23
Figura 12.- T <sub>sol-air</sub> en Gijón.....	24
Figura 13.- Condiciones de contorno del modelo.....	25
Figura 14.- Mallado del modelo junto ampliación del mallado en el PCM .....	26
Figura 15.-Mallado fachada tradicional.....	26
Figura 16.- Evolución temporal de la temperatura exterior.....	27
Figura 17.-Simulación de la temperatura en fachada tradicional en invierno .....	28
Figura 18.-Amortiguación y desfase de la onda termica en invierno .....	30
Figura 19.-Amortiguación y desfase de la onda térmica en verano .....	30

Figura 20.- Simulación de la temperatura en Solución 1.A en invierno .....	31
Figura 22.-Comparativa oscilación interna fachada tradicional y con PCM 20 hacia el exterior en invierno.....	34
Figura 23.-Comparativa oscilación interna fachada tradicional y con PCM 20 hacia el exterior en verano. ....	34
Figura 24.- Geometría fachada optimizada .....	35
Figura 25.-Comparativa oscilación de la temperatura interna de la solución tradicional y la solución optimizada en invierno.....	36
Figura 26.-Comparativa oscilación de la temperatura interna de la solución tradicional y la solución optimizada en verano. ....	36

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.-Propiedades materiales utilizados .....	21
Tabla 2.-Resultados fachada tradicional.....	29
Tabla 3-Resultados "solución 1" .....	32
Tabla 4.-Comparativa solución tradicional frente a fachada con PCM 20 instalado en el exterior.....	33
Tabla 5.-Comparativa resultados "solución 2" frente fachada tradicional .....	35

# 1. Introducción

La eficiencia energética se ha convertido en uno de los pilares fundamentales en la lucha contra el cambio climático y la reducción de la dependencia de fuentes de energía no renovables. Para mitigar el impacto ambiental y alcanzar la neutralidad climática, la optimización del consumo energético es una prioridad para la Unión Europea. Este desafío cobra especial relevancia en el sector de la edificación, que representa aproximadamente el 40% del consumo energético total en la UE y cerca del 36% de las emisiones de gases de efecto invernadero. Estas cifras subrayan la necesidad de adoptar medidas innovadoras y eficaces para reducir el impacto ambiental de los edificios, tanto en las nuevas construcciones como en los proyectos en rehabilitación.

Con este objetivo, el Parlamento Europeo ha establecido metas ambiciosas, como la reducción del 11,7% del consumo energético para 2030. Además, las normativas exigen que todas las nuevas construcciones sean climáticamente neutras a partir de ese mismo año, en línea con los compromisos establecidos en el Pacto Verde Europeo, cuya meta es alcanzar la neutralidad climática para 2050. Dentro de este contexto, la implementación de soluciones tecnológicas avanzadas en el ámbito de la construcción es crucial para cumplir con estos compromisos. Entre dichas soluciones, la mejora de la envolvente térmica de los edificios se posiciona como uno de los enfoques más efectivos para reducir el consumo energético, destacando la integración de sistemas de fachada activas [1].

Las fachadas activas representan una de las soluciones más innovadoras y efectivas en el ámbito de la edificación. A diferencia de las fachadas convencionales, las fachadas activas interactúan dinámicamente con las condiciones climáticas y los cambios en el entorno, regulando de manera continua el flujo de calor entre el interior y el exterior de edificio. Esta capacidad de adaptación no solo mejora el confort térmico de los ocupantes, sino que también reduce significativamente el consumo de energía al minimizar la dependencia de sistemas tradicionales de calefacción, ventilación y aire acondicionado.

Entre los tipos más destacados de fachadas activas se encuentran las fachadas ventiladas, las fachadas fotovoltaicas y las de vidrio activo. Las fachadas ventiladas activas, por ejemplo, cuentan con cámaras de aire que permiten gestionar el intercambio térmico, ajustando la

temperatura interior de manera dinámica. Por otro lado, las fachadas fotovoltaicas integran células que convierten la radiación solar en energía eléctrica, contribuyendo a la autosuficiencia energética del edificio. Asimismo, las fachadas de vidrio activo utilizan un sistema de triple acristalamiento y circulación de agua para optimizar el aislamiento y regular la temperatura interior según las condiciones externas [2].

En paralelo a estas innovaciones, la integración de Materiales de Cambio de Fase (PCMs, por sus siglas en inglés *Phase Change Materials*) ha emergido como una estrategia para mejorar la eficiencia energética de los edificios. Los PCMs son sustancias que almacenan y liberan energía térmica al cambiar de estado. Al integrarse en las fachadas activas, los PCMs regulan la temperatura interior de los edificios al absorber el calor durante el día y liberarlo por la noche.

El uso de PCMs en la envolvente de los edificios reduce el consumo energético al minimizar la necesidad de calefacción y refrigeración, mejorando el confort térmico y contribuyendo a la sostenibilidad. Sin embargo, para que esta tecnología se adopte de manera generalizada en el sector de la edificación, es crucial entender cómo se comportan estos materiales bajo diversas condiciones climáticas y cómo pueden integrarse de manera efectiva en el diseño y rehabilitación de los edificios.

El presente estudio se enfoca en analizar la viabilidad de las fachadas activas con la integración de PCMs, proporcionando un marco técnico que permita su aplicación efectiva en proyectos de construcción y rehabilitación. Al estudiar su comportamiento en diferentes condiciones climáticas, se espera fomentar su adopción a gran escala, contribuyendo así a la reducción del consumo energético y a la minimización del impacto ambiental, en línea con los objetivos de sostenibilidad y eficiencia energética establecidos por la Unión Europea [3].

## 2. Antecedentes

Los PCMs destacan como una solución innovadora en la optimización del rendimiento térmico en edificios. Este apartado analiza sus características, tipos, y potencial aplicación en envolventes de edificaciones, con el objetivo de mejorar la eficiencia energética.

### 2.1.- MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

Los PCMs son sustancias que tienen la capacidad de almacenar o liberar energía térmica durante su transición entre estados sólidos y líquidos (o viceversa), proceso conocido como cambio de fase. Este fenómeno es isotermo, es decir, tiene lugar a temperatura constante y la energía intercambiada durante el proceso se denomina calor latente [4].

Para comprender el comportamiento de los PCM, es fundamental diferenciar la capacidad calorífica latente de la sensible. La capacidad calorífica sensible se refiere a la habilidad de un material para absorber energía térmica mientras su temperatura aumenta. En cambio, la capacidad calorífica latente es la capacidad de un material para absorber o liberar energía térmica durante su fusión o solidificación, sin que su temperatura varíe [5].

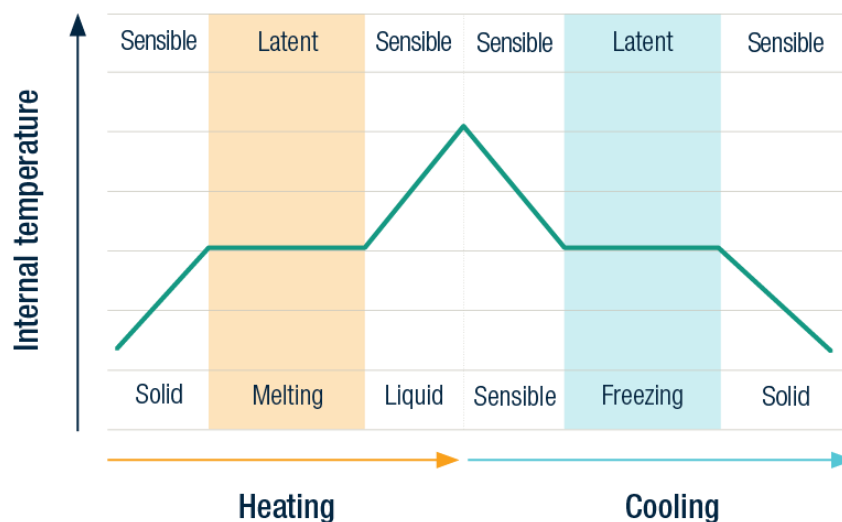


Figura 1.- Diferencia entre calor latente y sensible [5].



Un ejemplo que ilustra el comportamiento de los PCMs en función de la temperatura es lo que sucede al colocar un vaso con cubitos de hielo bajo la luz del sol. Inicialmente, el hielo empieza a absorber calor de manera sensible, lo que significa que su temperatura aumenta gradualmente. Sin embargo, una vez que el hielo alcanza los 0°C (temperatura de transición de fase), comienza a derretirse. Durante este proceso de fusión, si se mide la temperatura del líquido, se observará que permanece constante a 0°C mientras exista hielo en el vaso. Esto sucede porque, durante el cambio de fase el PCM, que en este caso es el hielo, mantiene su temperatura fija hasta que todo el material se transforma en líquido, y es esto lo que se conoce como calor latente [5].

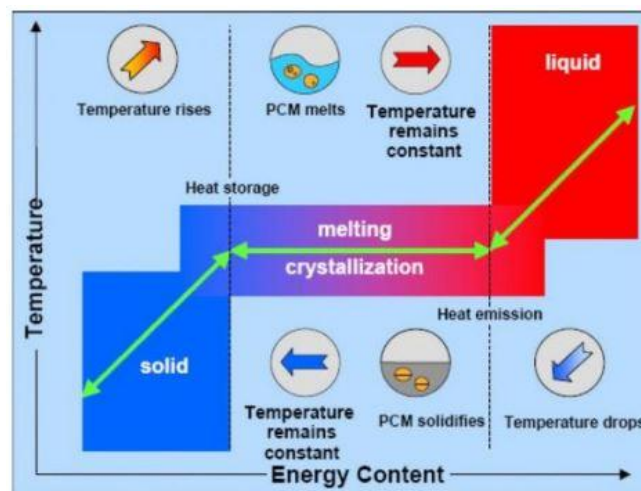


Figura 2.- Comportamiento del PCM durante su transición a estados sólidos y líquidos [6].

La capacidad de almacenamiento de los PCM en términos de energía térmica latente es significativamente mayor que la de los materiales convencionales que almacenan calor sensible. Como consecuencia, se necesita una cantidad mucho menor de un PCM para almacenar la misma cantidad de energía calorífica que se obtendría utilizando un material que no cambia de fase. Esta característica hace que los PCMs sean un material con gran potencial para aplicaciones de acumulación de energía térmica (conocido como *Thermal Energy Storage* en inglés), especialmente en el sector de la edificación, donde su empleo puede optimizar el diseño de los cerramientos, reduciendo su grosor y mejorando la eficiencia térmica y el confort interior de los espacios.

El almacenamiento de energía térmica mediante PCM conlleva un aumento en la inercia térmica de la envolvente. La inercia térmica se define como la capacidad de los materiales para absorber, almacenar o liberar calor lentamente. Un material con alta inercia térmica

puede absorber mucho calor sin calentarse rápidamente, y de la misma manera, liberar este calor lentamente cuando las temperaturas descieran. Esta propiedad depende de la masa, del calor específico de los materiales y del coeficiente de conductividad térmica [7], [8].

La medición de la inercia térmica comprende dos términos esenciales: el amortiguamiento y el desfase. El amortiguamiento se refiere a la disminución de la variación de temperatura entre el exterior y el interior de un cerramiento, mientras que el desfase, es el tiempo que tarda la onda de calor en atravesar el cerramiento [9].

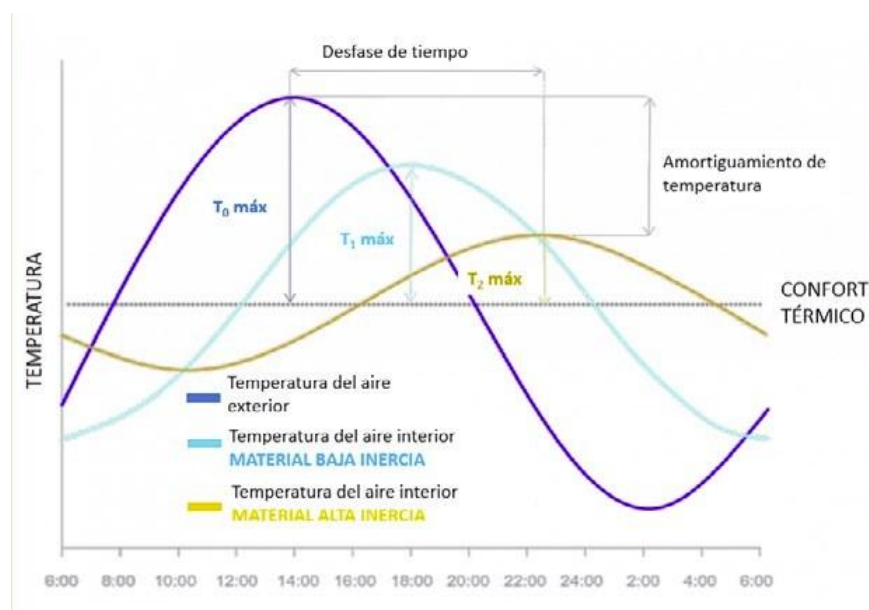


Figura 3.- Efecto de la inercia térmica [9].

Los PCM pueden contribuir significativamente a aumentar la inercia térmica de un edificio debido a su capacidad para almacenar y liberar calor durante sus cambios de fase. Esto permite reducir las fluctuaciones de temperatura y mantener las condiciones térmicas estables dentro de un edificio. En términos prácticos, el PCM absorberá el exceso de calor durante el día (cuando las temperaturas externas son más altas) y lo liberará gradualmente durante la noche (cuando las temperaturas descien).

Para que los PCM mejoren el rendimiento térmico de una envolvente, es esencial que se produzca el cambio de fase. Por tanto, la selección de un PCM con una temperatura de fusión adecuada es fundamental. La temperatura de cambio de fase debe adecuarse no solo a la

temperatura del clima en el que se encuentra, sino también a la posición del PCM en la envolvente, así como a las condiciones de temperatura interior establecidas [10], [11] .

A pesar de su gran potencial, las aplicaciones reales de los PCM en el sector de la edificación aún son limitadas. Esto se debe principalmente a la falta de información y divulgación sobre sus beneficios. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo es evaluar el impacto de su incorporación en las envolventes de los edificios y explorar su potencial para mejorar el rendimiento y la eficiencia térmica en construcciones nuevas [12], [13].

Los PCM se dividen principalmente en dos grandes familias: materiales orgánicos e inorgánicos. Además de destacar un tercer tipo que son las mezclas eutécticas, que combinan dos o más componentes orgánicos, inorgánicos o ambos. Estas mezclas permiten obtener temperaturas de fusión variables dependiendo de la concentración de cada componente de la mezcla [14].

Entre los materiales inorgánicos más utilizados, destacan las sales hidratadas, caracterizadas por su bajo coste, alta densidad de almacenamiento térmico, elevada conductividad térmica y el hecho de que son tanto reciclables como biodegradables. Por otro lado, los materiales orgánicos más comunes, son las parafinas y ácidos grasos. Estos materiales son fáciles de manejar, presentan una gran estabilidad térmica y química y se pueden reciclar, pero su conductividad térmica es más baja, son inflamables y además suelen ser más costosos [15].

PCM INORGÁNICO		PCM ORGÁNICO
+	Calor latente	-
+	Densidad	-
+	Conductividad térmica	-
-	Estabilidad termo-química	+
-	Corrosivo	+

Figura 4.- Propiedades tipos de PCM [14].

Sin embargo, la mayoría de los PCM presentan limitaciones que complican su aplicación eficiente en sistemas de almacenamiento de energía térmica, como la baja conductividad

térmica, la corrosión y, en algunos casos, la toxicidad. Para superar estos desafíos, una solución ampliamente utilizada es la encapsulación.

La encapsulación consiste en aislar los PCM dentro de materiales que mejoran su resistencia y estabilidad térmica, proporcionando una barrera protectora que evita el contacto del material con el entorno. Esto no solo ayuda a prevenir la degradación del PCM por factores externos, sino que también facilita su manejo y mejora su capacidad de integración en sistemas complejos. Además, esta técnica reduce los problemas como la corrosión y el cambio de volumen que se produce durante los procesos de fusión y solidificación, mejorando el rendimiento del material en aplicaciones prácticas.

Según el tamaño de las cápsulas, existen diferentes tipos de encapsulación:

- Macroencapsulación, con diámetros de 1 mm a más de 1 cm.
- Microencapsulación, con diámetros de entre 1  $\mu\text{m}$  y 1 mm.
- Nanoencapsulación, con diámetros inferiores a 1  $\mu\text{m}$ .

En este estudio, se emplean PCM macroencapsulados, una solución sencilla y económica de implementar en sistemas donde se requiere una mayor cantidad de PCM, como es el caso del sector de la edificación [23].

### 3. Objetivos

El objetivo principal de este estudio es evaluar si la incorporación de PCMs en fachadas activas mejora la eficiencia energética y el confort térmico en comparación con las fachadas tradicionales. Para ello, se realizará un análisis térmico detallado, que incluirá la medición de parámetros como la oscilación interna de la temperatura, entre otros indicadores relevantes.

Este objetivo se desglosa en varios objetivos específicos, cada uno de los cuales aborda un aspecto crucial del estudio:

- Análisis de la Fachada tradicional:

El primer paso consiste en analizar el comportamiento térmico de una fachada tradicional, mediante el software de elementos finitos ANSYS®. Este permitirá simular y estudiar en detalle las características térmicas de una fachada convencional, sirviendo como caso de referencia para posteriores comparaciones con las fachadas que incorporen PCM.

- Estudio de distintas configuraciones de fachadas con PCM:

Una vez establecida la referencia, el siguiente paso es evaluar diferentes configuraciones de fachadas que incorporen PCM. Este análisis tiene como finalidad determinar la ubicación óptima y el tipo de PCM que ofrezcan los mejores resultados en términos de reducción de la oscilación térmica y aumento del desfase térmico. Las simulaciones se realizarán bajo las mismas condiciones climáticas utilizadas para el análisis de la fachada tradicional.

- Optimización del espesor de la envolvente:

El tercer objetivo se centra en optimizar el espesor total de la envolvente. Se busca encontrar un equilibrio entre el espesor de los materiales aislantes y el confort térmico proporcionado por los PCM. La hipótesis es que la incorporación de PCM puede permitir la reducción del espesor del aislante tradicional, sin comprometer el rendimiento térmico.

- Aplicación en condiciones reales:

Se analizará como las fachadas con PCM responden a las variaciones de las condiciones climáticas exteriores y cómo esto afecta las condiciones internas del

edificio. Esto proporcionará una comprensión profunda del rendimiento térmico de las fachadas con PCM en diferentes situaciones, respaldando su implementación en proyectos de construcción reales.

La viabilidad de incorporar PCMs a fachadas convencionales, quedará demostrada si se evidencia que añadir una capa de PCM complementaria a la capa aislante convencional logra los siguientes beneficios:

- Aumento de la inercia térmica, lo que implica una mayor capacidad para amortiguar las fluctuaciones de temperatura externa y mantener una temperatura interna más estable.
- Posibilidad de utilizar envolventes térmicas igual de efectivas con menor espesor, ofreciendo ventajas en términos de habitabilidad y ahorro de espacio.
- Ahorro energético significativo, al mejorar el aislamiento térmico, se espera que se necesite menos energía para calefacción y refrigeración, lo que resultaría en ahorros económicos y ambientales.

Si se comprueba que los PCM cumplen estos criterios, se discutirá si es más ventajoso aprovechar el ahorro de espacio resultante de la reducción del espesor de la envolvente o mantener el espesor original para maximizar las propiedades de aislamiento térmico.

## 4. Metodología

Este estudio compara una fachada tradicional, diseñada conforme al Código Técnico de la Edificación (CTE), con dos soluciones de fachadas activas que incorporan PCM, denominadas “Solución 1” y “Solución 2”. Este enfoque facilita el análisis comparativo del comportamiento térmico de la fachada tradicional frente a las soluciones activas con PCM, destacando su capacidad para optimizar la eficiencia energética.

### Fachada Tradicional

La fachada tradicional sirve como referencia base para el análisis comparativo. Para obtener una visualización más detallada, la Figura 5 muestra la geometría de la fachada tradicional, modelada con el software de diseño Autodesk Inventor Professional 2023.

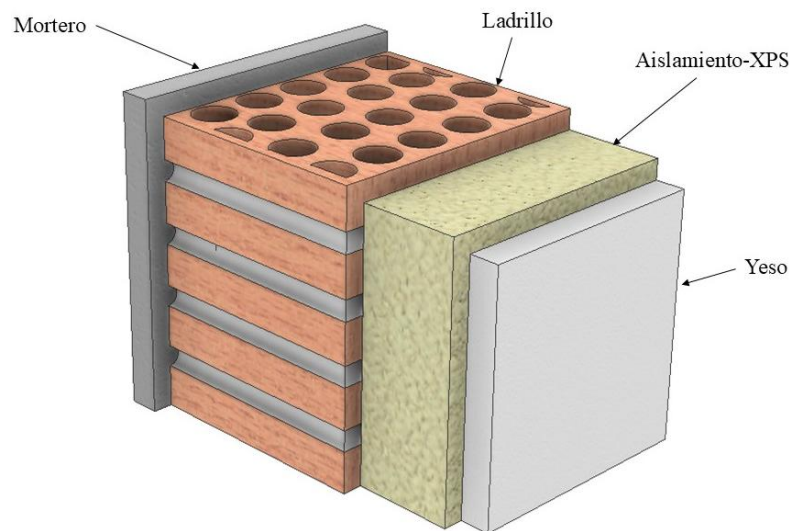


Figura 5.- Fachada tradicional con sus respectivos materiales

### Solución 1

La “Solución 1” introduce PCM manteniendo el espesor total de la fachada tradicional. Para ello, se reduce el espesor del aislante original y se incorpora el PCM. En esta propuesta se evalúa su ubicación tanto hacia el exterior de la fachada como hacia el interior. Estas configuraciones se denominan, respectivamente, como “Solución 1.A” y “Solución 1.B”. Además, se prueban distintos tipos de PCM para determinar cuál ofrece mejores resultados.

En la Figura 6 se muestra esta solución, creada mediante el software de diseño Autodesk Inventor Professional 2023.

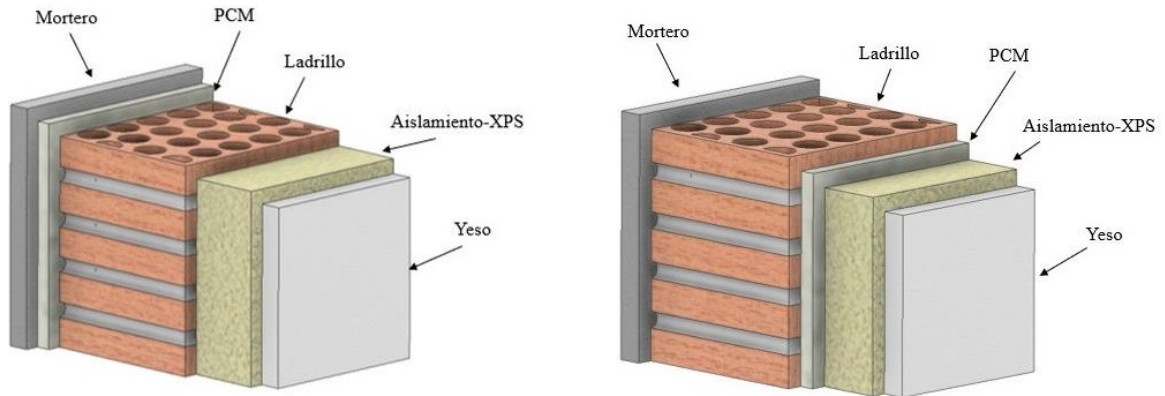


Figura 6.-Fachada con PCM, “Solución 1.A” (izquierda) y “Solución 1.B” (derecha)

## Solución 2

La “Solución 2” propone reducir el espesor del aislante al mínimo recomendado por el CTE. Evaluando si esta configuración, junto con el PCM, mantiene las mismas condiciones de confort térmico obtenidas con la solución tradicional.

## 4.1.- PARÁMETROS Y PROCESO PARA LA EVALUACIÓN TÉRMICA

Estas configuraciones son sometidas a análisis para determinar cuál ofrece el mejor rendimiento térmico en términos de amortiguación de temperatura y confort interior. Para ello, se calculan los siguientes parámetros:

- **Oscilación interna de la temperatura ( $\Delta T_{int}$ ).** Variaciones cíclicas de la temperatura a lo largo del tiempo. Se calcula como la diferencia entre la temperatura máxima y mínima de la superficie interior de la envolvente.

$$\Delta T_{int} = T_{int,max} - T_{int,min} \quad 1)$$

Donde:



- $T_{int,max}$  es la temperatura máxima en °C en la superficie interior
- $T_{int,min}$  es la temperatura mínima en °C en la superficie interior.
- **Desfase de la onda térmica ( $\Phi$ ).** Tiempo en horas que tarda el cerramiento en retrasar el efecto de los cambios de temperatura exterior sobre el interior. En otras palabras, mide el tiempo que tarda la onda térmica en atravesar el cerramiento. Se calcula determinando el tiempo que transcurre entre el instante en el que se alcanza la temperatura máxima exterior y el instante en el que se alcanza la temperatura máxima interior.

$$\Phi = t_{T_{int,max}} - t_{T_{ext,max}} \quad 2)$$

Donde:

- $t_{T_{int,max}}$  es el instante en el que la temperatura interior alcanza su valor máximo.
- $t_{T_{ext,max}}$  es el instante en el que temperatura exterior alcanza su valor máximo.

El objetivo es minimizar la oscilación térmica en el interior, a pesar de las variaciones en la temperatura exterior.

El análisis térmico de las distintas configuraciones se lleva a cabo utilizando el Método de Elementos Finitos (MEF) en el software Ansys Workbench ® 2024 [16]. Este proceso se divide en tres etapas principales.

1. **Preprocesado.** En esta fase inicial se prepara el modelo para el análisis. Esto incluye la creación de la geometría de cada una de las configuraciones, la asignación de las propiedades de los materiales a utilizar, la generación de la malla de elementos finitos y la definición de las condiciones de contorno (como temperatura y convección), para simular la transmisión de calor a través de la fachada.
2. **Solución (Solver).** Aquí, el software resuelve las ecuaciones matemáticas de equilibrio que dan solución al problema térmica de cada fachada estudiada.

3. **Post procesado.** Se visualizan los resultados. Con los resultados obtenidos en el post procesado, el usuario los interpreta. En este caso, interesa observar la oscilación de la temperatura en cada parte de la envolvente, prestando especial atención a la temperatura en la cara interior de la fachada que está en contacto con el ambiente interior. El post procesado permite identificar las áreas donde el PCM es más efectivo para amortiguar los cambios de temperatura exterior y proporcionar un confort térmico más estable.

Finalmente, los resultados de cada simulación se exportan a un software de Excel, facilitando la interpretación y representación gráfica de la información obtenida para un análisis más detallado.

## 5. Modelo Numérico

Se utilizan modelos numéricos bidimensionales (2D) para las simulaciones por elementos finitos. Para este análisis con el software Ansys Workbench ©2024 [16], se emplea el módulo Transient Thermal debido a la naturaleza no estacionaria de los cálculos térmicos. Es crucial destacar el tipo de elementos finitos empleados en este tipo de simulaciones. En particular, en el presente estudio se utilizan elementos finitos tipo PLANE293, que son elementos finitos bidimensionales (2D) de ocho nodos, cada uno con un único grado de libertad por nodo asociado a la temperatura.

A continuación, se detallan los aspectos necesarios para la correcta implementación del método de elementos finitos en las distintas configuraciones a analizar. Estos aspectos son comunes para todas las soluciones estudiadas.

### Geometría

La fachada tradicional, utilizada como referencia inicial para los cálculos, se muestra en la Figura 7. Los espesores de los distintos componentes de la envolvente están definidos por el CTE y se mantendrán constantes en todas las soluciones analizadas.

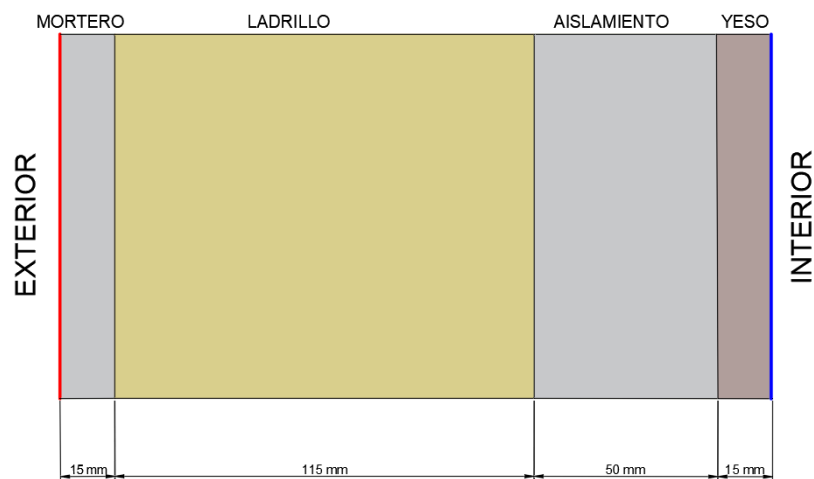


Figura 7.- Geometría fachada tradicional

El espesor de la capa de aislamiento no está fijado por el CTE con un valor exacto, sino que depende de los requerimientos de transmitancia térmica establecidos para el tipo de fachada y zona climática. En este caso, se utiliza un valor común de 50 mm, que corresponde a una

solución estándar comercial para cumplir con dichos requerimientos en fachadas convencionales.

En la “Solución 1”, se mantiene el espesor total de la envolvente y el aislamiento se reduce a 40 mm, permitiendo la incorporación de una capa de PCM de 10mm sin alterar el grosor original de la fachada.

Además, en esta solución se evalúa el efecto de ubicar el PCM tanto hacia el exterior de la fachada como hacia el interior. Estas configuraciones denominadas “Solución 1.A” (PCM hacia el exterior) y “Solución 1.B” (PCM hacia el interior) se muestran en la Figura 15. En ella, se presentan los espesores ajustados del cerramiento tras la incorporación de una capa de PCM de 10 mm, sin modificar el espesor total de la fachada.

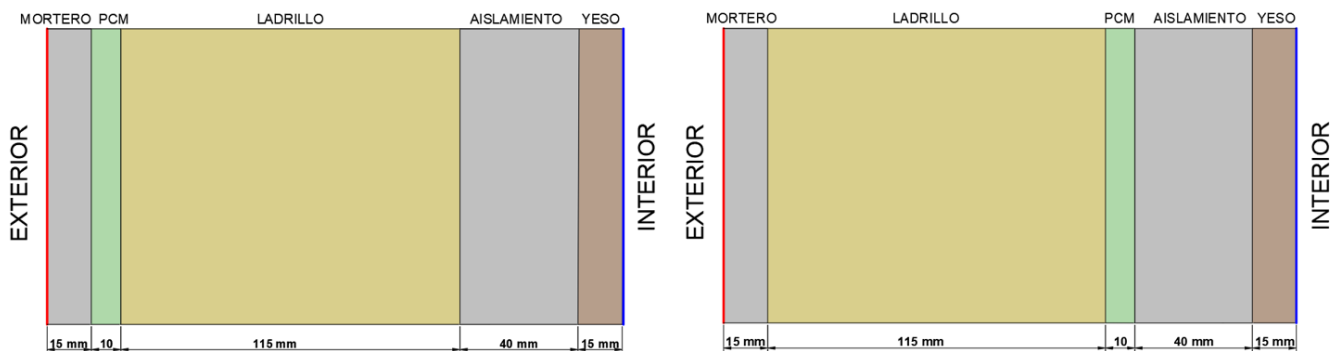


Figura 8.-Fachada “Solución 1.A” (izquierda) y fachada “Solución 1.B” (derecha)

En la “Solución 2” se busca minimizar el espesor total de la fachada sin comprometer el confort térmico, por lo que se evalúan reducciones graduales del espesor del aislamiento, en incrementos de 10 mm, con el fin de determinar la opción más eficiente en términos térmicos.

Ansys Workbench ® permite crear la geometría del modelo directamente en el software, utilizando el módulo DesignModeler y posteriormente parametrizar variables geométricas. En la Figura 9 se muestra, como ejemplo de este módulo, la geometría de la fachada tradicional a simular, como de las fachadas con PCM de ambas soluciones.

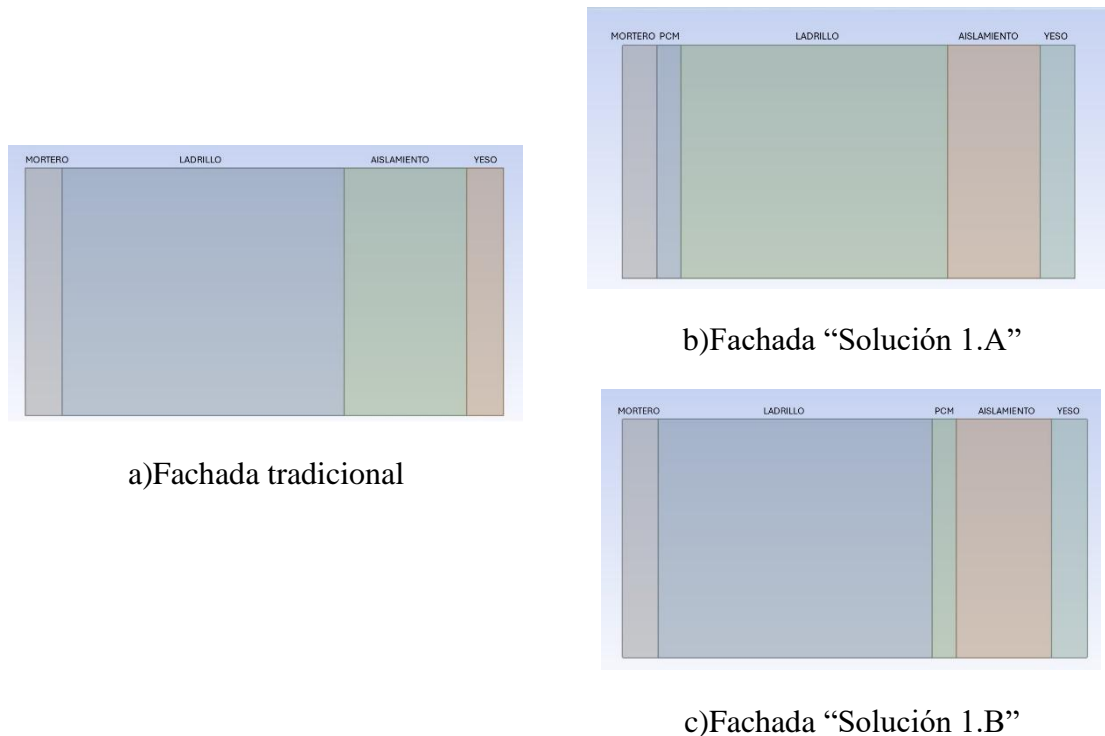


Figura 9.- Geometría de las configuraciones de fachadas a simular en Ansys ®

### **Propiedades de los materiales.**

En el software se definen los materiales a utilizar en los modelos de las fachadas a estudiar. Estas propiedades, determinadas por el CTE, se presentan en la Tabla 1 y son comunes para todas las configuraciones analizadas de la envolvente.

	<b>Aislamiento-XPS</b>	<b>Ladrillo</b>	<b>Mortero</b>	<b>Yeso</b>
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	55	2170	1900	1300
Conductividad (W/m·K)	0,036	0,96	1,3	0,57
Calor específico (Cp) (J/kg·K)	1210	1000	1000	1000

Tabla 1.-Propiedades materiales utilizados

Por otro lado, las propiedades de los PCM a incorporar han sido previamente obtenidas por el grupo de investigación GICONSIME de la Universidad de Oviedo mediante ensayos de laboratorio específicos. Para modelar el comportamiento del cambio de fase de estos materiales, se utiliza el método de la capacidad efectiva, que combina el calor sensible y el calor latente (el calor absorbido o liberado durante el cambio de fase de sólido a líquido) en una única propiedad llamada capacidad térmica efectiva. Esta capacidad térmica efectiva

aumenta significativamente en el rango de temperaturas donde el PCM cambia de fase, reflejando así el calor latente involucrado en el proceso [17].

En las simulaciones se utilizan distintos PCM para determinar cuál de ellos proporciona la mejor solución. Se analizan tres tipos, nombrados según la temperatura en la que la capacidad efectiva alcanza su valor máximo: PCM 15, PCM 20 y PCM 25, representados en la Figura 10.

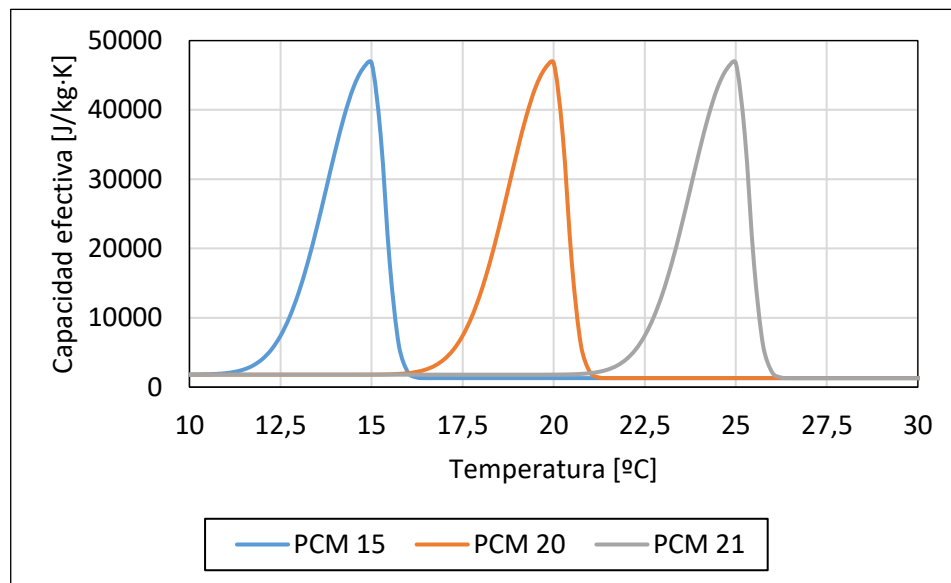


Figura 10.- Capacidad efectiva equivalente para los PCM's utilizados.

Además de la capacidad efectiva térmica, también se debe tener en cuenta la densidad y conductividad térmica de estos PCM's. La conductividad térmica es constante con la temperatura y tiene un valor de 0,2 W/m°C en los tres PCM's analizados. En cambio, la densidad depende del estado del PCM, variando entre 770 y 880 kg/m<sup>3</sup> en estados sólido y líquido, respectivamente. En la Figura 11 se muestran las gráficas de densidad utilizadas.

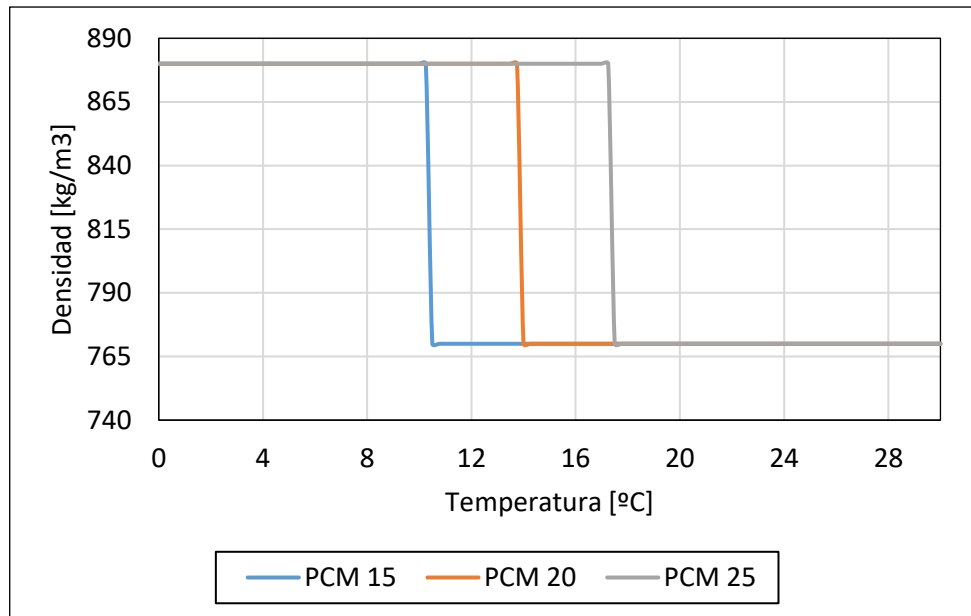


Figura 11.- Curvas de densidad de los PCMs utilizados

### **Condiciones de contorno.**

Se establece una condición de convección en la superficie interior de la fachada, con un coeficiente de convección de  $7,69 \text{ W/m}^2\cdot\text{°C}$  y temperaturas interiores de  $25\text{°C}$  en verano y  $22\text{°C}$  en invierno, conforme a la norma UNE-EN ISO 6946 [18]. Para el modelado de esta condición, se utilizan elementos SURF151, adecuados para análisis térmicos bidimensionales que consideran efectos de convección y radiación.

En lo que respecta a la superficie exterior de la fachada, se define una condición de temperatura que permite evaluar el comportamiento térmico de las soluciones propuestas. Para ello, se aplican las condiciones climáticas reales de Gijón a cada una de las fachadas analizadas, tanto para verano como para invierno. Estos datos climáticos se obtienen de la base de datos de Meteonorm [19], que proporciona información sobre la temperatura del aire y la irradiación solar global en una superficie vertical orientada al sur, la cual maximiza la captación de energía solar.

Se usa el método de la *Temperatura sol-air*, que calcula la temperatura equivalente que tendría una fachada expuesta a ciertas condiciones de convección con el aire ambiente y radiación solar, es decir, *Tsol-air* se define como la combinación de la temperatura ambiente

exterior y el efecto de irradiación solar en la superficie de la fachada, mediante la siguiente fórmula:

$$T_{sol-air} = T_{ext} + \frac{\alpha \cdot q_{sol}}{h} \quad 3)$$

donde:

- $T_{ext}$  es la temperatura ambiente exterior, la cual depende de la ubicación y la hora del día.
- $\alpha$  es la absorptividad del material más exterior, que depende únicamente del material.
- $q_{sol}$  es la irradiación solar global sobre la superficie vertical, que varía según la ubicación y la hora del día, siendo máxima en superficies orientadas al sur.
- $h$  es el coeficiente de convección exterior. Se usa un valor constante de 25 W/m<sup>2</sup>K, proporcionado de acuerdo con el CTE.

En lugar de utilizar registros continuos, se selecciona un día típico representativo para cada mes del año. Para Gijón, el día más frío se encuentra en el mes de febrero, mientras que el más caluroso se sitúa en agosto. Este día típico se repite cuatro veces seguidas (cuatro días) en las simulaciones para garantizar que el sistema alcance una condición de estabilidad.

A continuación, en la Figura 12, se muestran las gráficas obtenidas con el método T<sub>sol-air</sub> tanto para verano (mes de agosto), como invierno (mes de febrero).

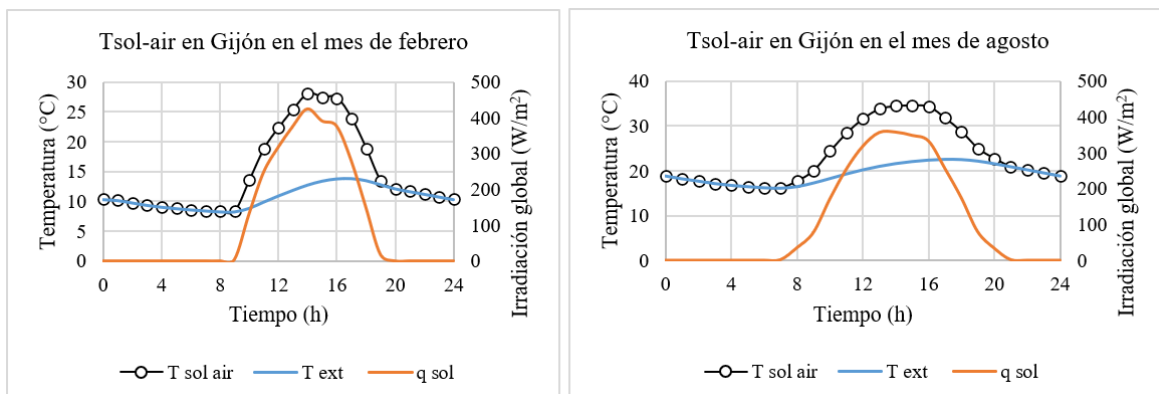


Figura 12.- T<sub>sol-air</sub> en Gijón

La Figura 13 muestra cómo queda el modelo con las condiciones de contorno tanto de temperatura y convección establecidas.



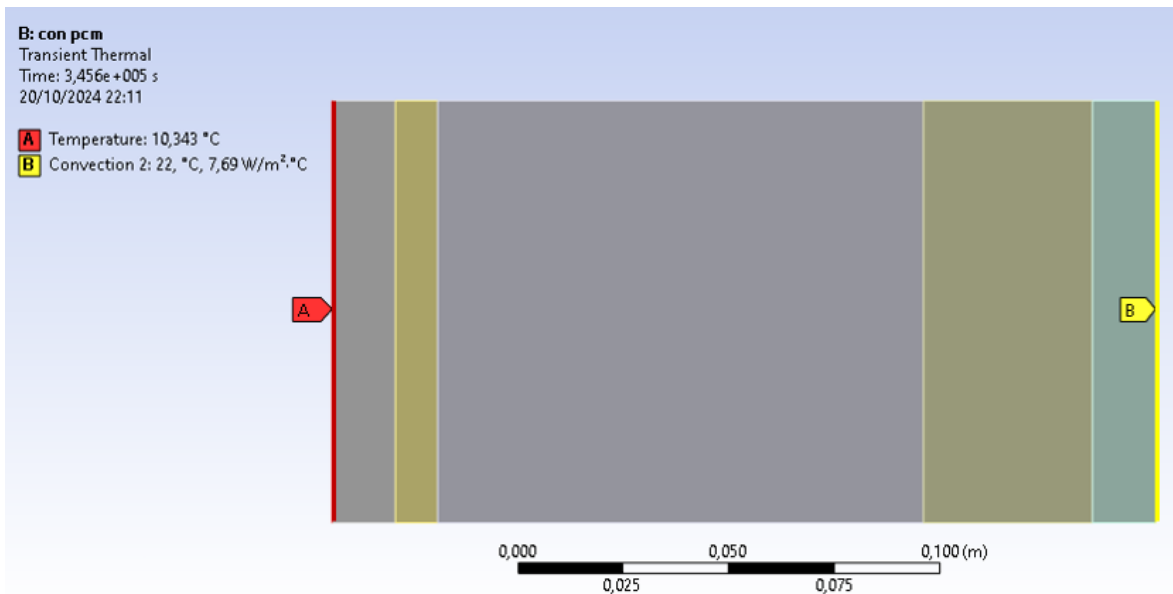


Figura 13.- Condiciones de contorno del modelo

### Mallado

El proceso de mallado es fundamental, ya que divide la geometría en pequeños elementos finitos, lo que permite una mayor precisión en la simulación, dado que cada elemento puede experimentar cambios individuales en su comportamiento térmico.

En todas las envolventes, se realiza un mallado fino en cada superficie de contacto con un tamaño de elemento de 2 mm. Además, en las configuraciones que incorporan PCM, se añade un mallado adicional de elementos de 1 mm en el propio PCM. Esto asegura un número adecuado de puntos de cálculos y mejora la resolución de los resultados en las zonas críticas donde se produce el cambio de fase.

La Figura 14 y 15 se ilustra el mallado de ambas configuraciones de la envolvente, tanto de la fachada tradicional, como de las fachadas que incorporan PCM, incluyendo una ampliación que destaca el área donde se ha implementado el mallado más fino en el PCM.

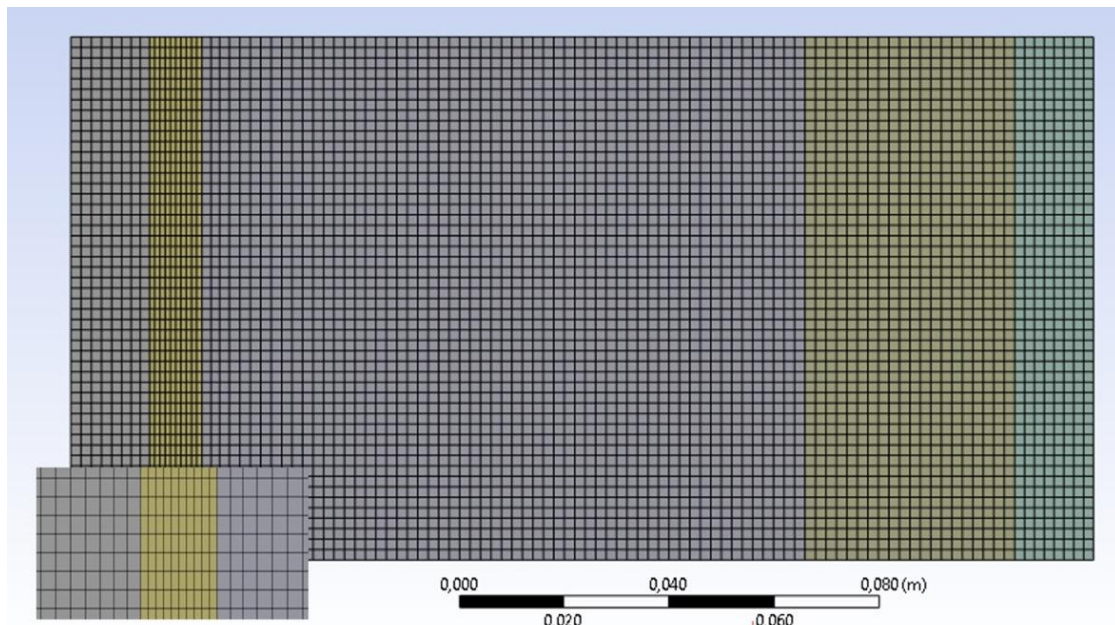


Figura 14.- Mallado del modelo junto ampliación del mallado en el PCM

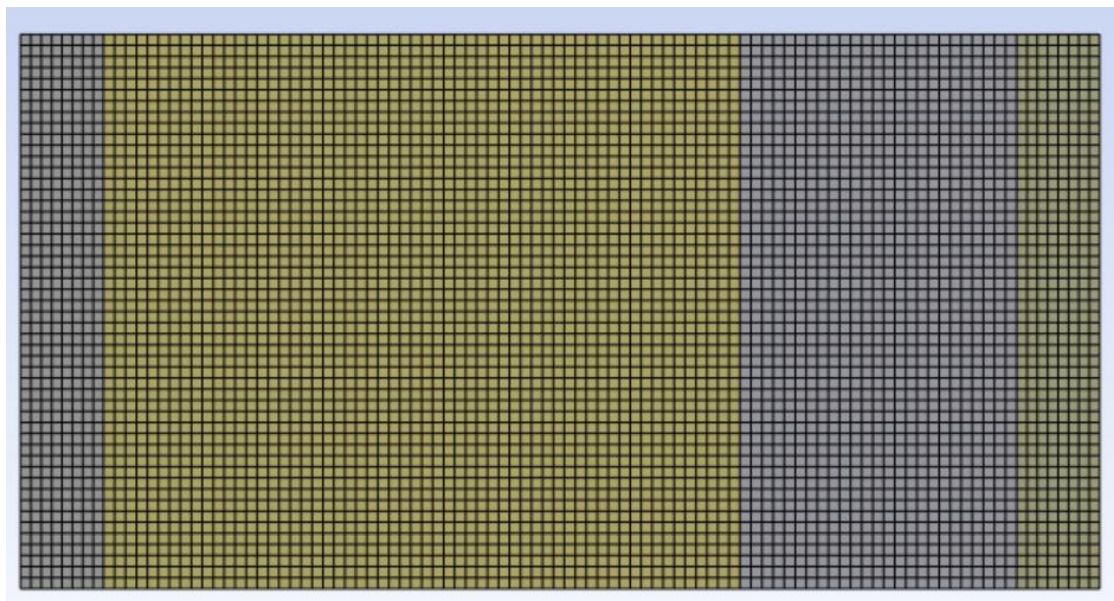


Figura 15.-Mallado fachada tradicional

### **Modelización transitoria**

Se realizan simulaciones mediante análisis térmico transitorio para identificar el comportamiento térmico en el tiempo y la respuesta dinámica de la envolvente frente a cambios de temperatura. Se modela un periodo de 4 días, repitiendo la condición de contorno de temperatura en la superficie exterior en cuatro ciclos consecutivos para todas las fachadas.

Esta repetición es necesaria para asegurar que las envolventes alcanzaron un estado de estabilización térmica. En consecuencia, el tiempo total simulado es de 96 horas, representado en la Figura 16.

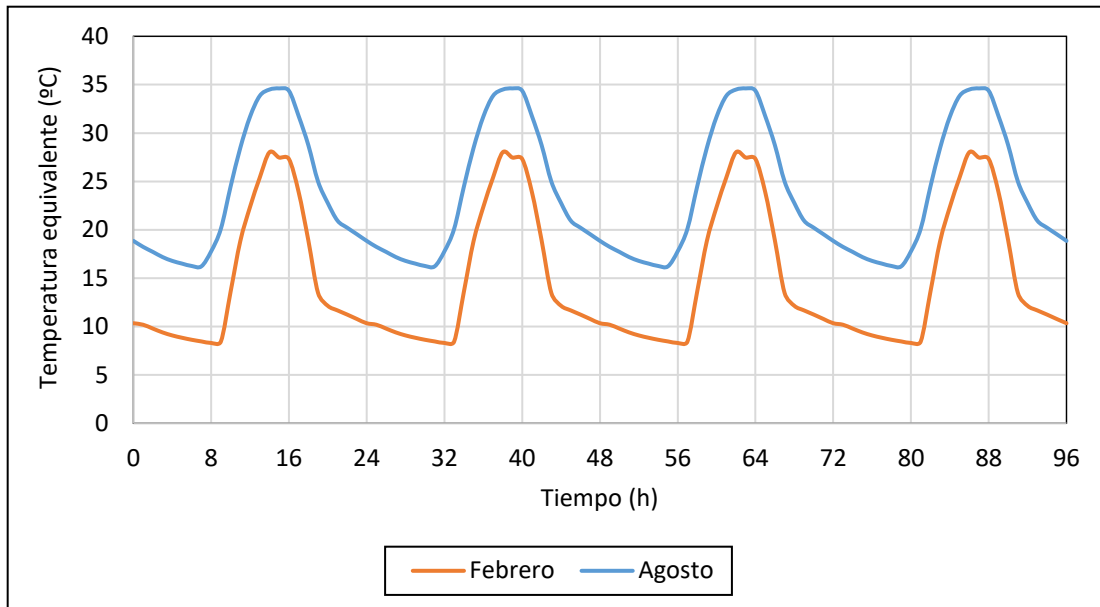


Figura 16.- Evolución temporal de la temperatura exterior

## 6. Resultados

En este apartado se presentan los resultados obtenidos durante las simulaciones térmicas de las diferentes soluciones de fachadas estudiadas en el trabajo. Cada modelo se evalúa bajo las condiciones de contorno correspondientes al clima de Gijón, tanto para invierno como para verano. Todos los resultados incluyen parámetros clave como la oscilación térmica en la superficie interior y el desfase de la onda térmica, lo que permite valorar el impacto de los PCM en el confort térmico interior y la estabilidad de la temperatura a lo largo del tiempo.

### 6.1.- SOLUCIÓN TRADICIONAL

Inicialmente, se modela la solución tradicional para utilizarla como caso de referencia para comparar con el resto de las configuraciones. En la Figura 17 se muestra la simulación del campo de temperaturas, que permite visualizar cómo se comporta la transferencia de calor a lo largo de la fachada en Ansys Workbench. Los resultados se presentan en una escala de colores que indica las temperaturas en °C, desde el azul con las temperaturas más bajas hasta el rojo para las más altas.

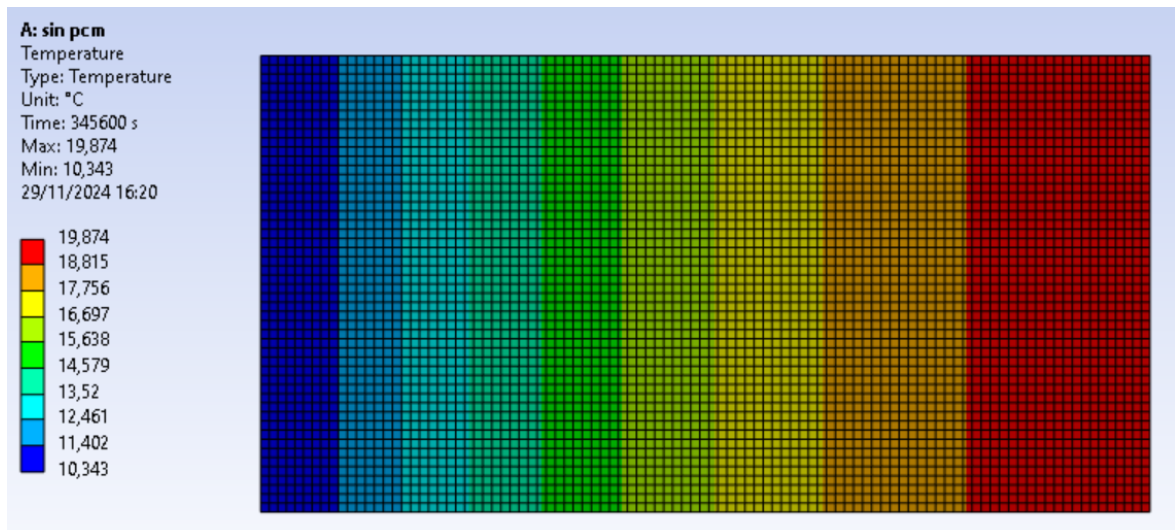


Figura 17.-Simulación de la temperatura en fachada tradicional en invierno

En la Tabla 2 se presentan los resultados del análisis de la fachada tanto en invierno y verano.

Se observa un porcentaje de amortiguamiento respecto a la temperatura exterior, de aproximadamente un 78% en ambas estaciones. Este valor indica la reducción en la variación de temperatura entre el exterior y el interior de la envolvente. Aunque un amortiguamiento del 78% evidencia que la fachada contribuye significativamente al control de la temperatura interna, no se considera suficientemente alto para asegurar una estabilidad térmica interior óptima.

Para alcanzar una estabilidad térmica interior adecuada, el valor de amortiguamiento debería situarse entre el 85% y el 95%. Este rango asegura que las fluctuaciones de temperatura en el interior del edificio sean mínimas en comparación con las variaciones exteriores, proporcionando así un ambiente interior confortable [9].

Mes	Oscilación térmica (°C)	Amortiguación (%)	Desfase onda térmica (h)
Invierno	4,237	78,50%	5
Verano	4,176	77,30%	4

Tabla 2.-Resultados fachada tradicional

Asimismo, se calcula el desfase de la onda térmica, el cual depende de factores como la conductividad térmica, la densidad, el espesor y el calor específico de los materiales. Según estudios técnicos sobre eficiencia energética y confort térmico, como el realizado por el arquitecto Eduardo Martín Del Toro [9], un desfase temporal superior a 10 horas se considera ideal para garantizar que las variaciones de temperatura exterior se retrasen lo suficiente, minimizando su impacto en las condiciones interiores. Sin embargo, los resultados obtenidos se encuentran significativamente por debajo de este valor.

En las Figuras 18 y 19, se visualizan los resultados obtenidos de desfase y amortiguación de la onda térmica para la estación de verano y de invierno.

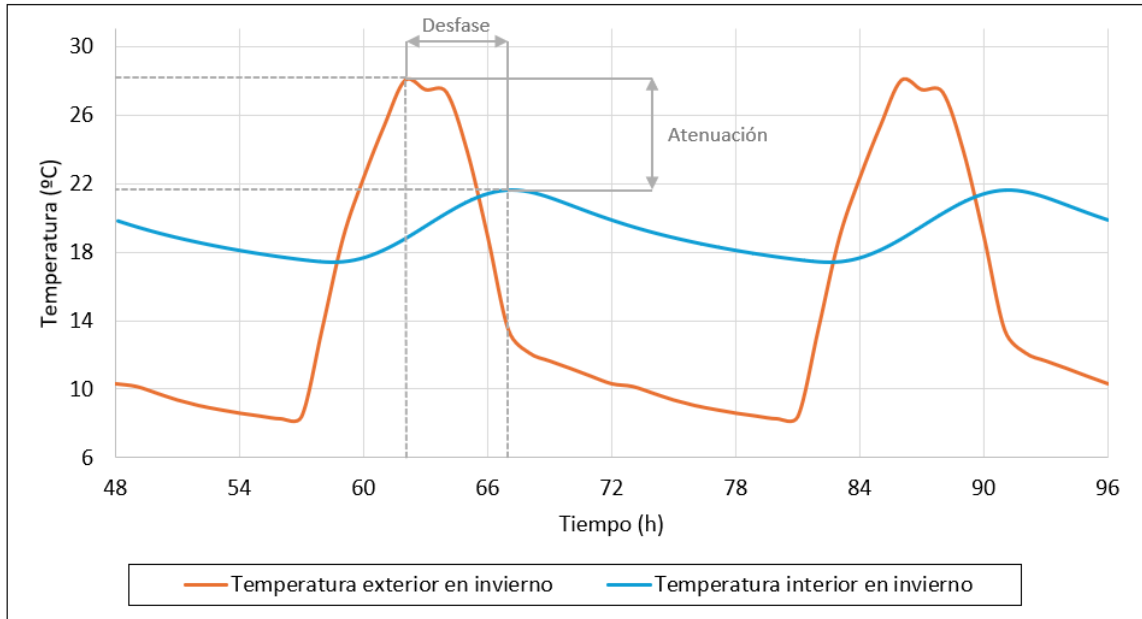


Figura 18.-Amortiguación y desfase de la onda termica en invierno

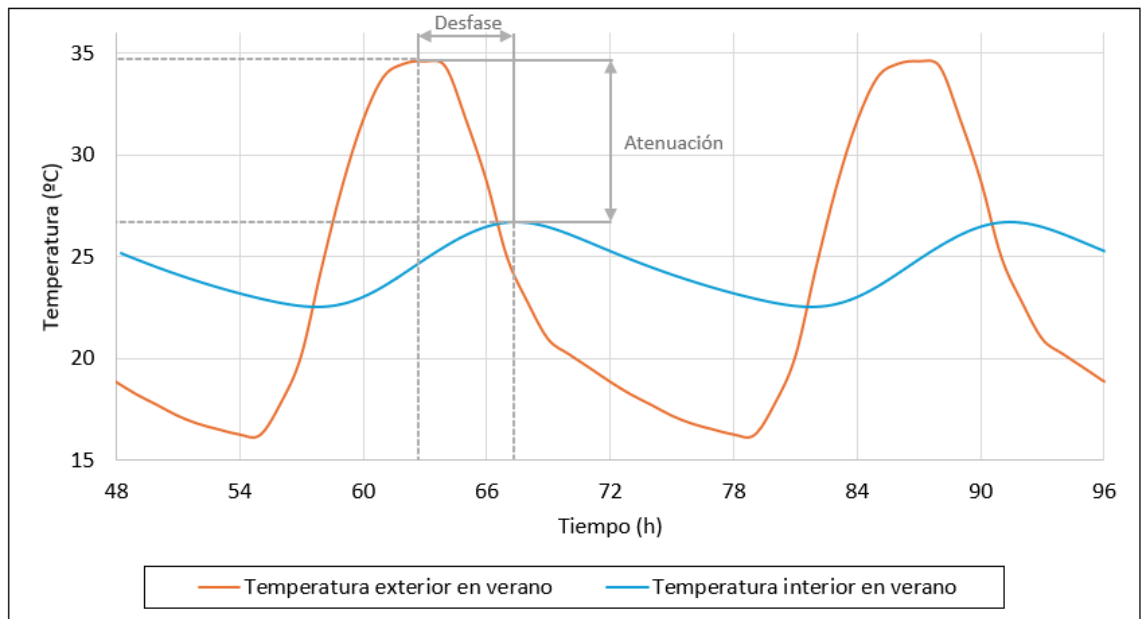


Figura 19.-Amortiguación y desfase de la onda térmica en verano

## 6.2.- SOLUCIÓN 1

En esta sección se analiza la Solución 1, que comprende las dos configuraciones: Solución 1.A y Solución 1.B, explicadas en apartados anteriores. Ambas se evaluaron bajo condiciones de invierno y verano para todos los caso de estudio.

En este contexto, para ejemplificar previamente alguno de los resultados, se ha seleccionado como caso inicial representativo la Solución 1.A sometida a las condiciones de invierno.

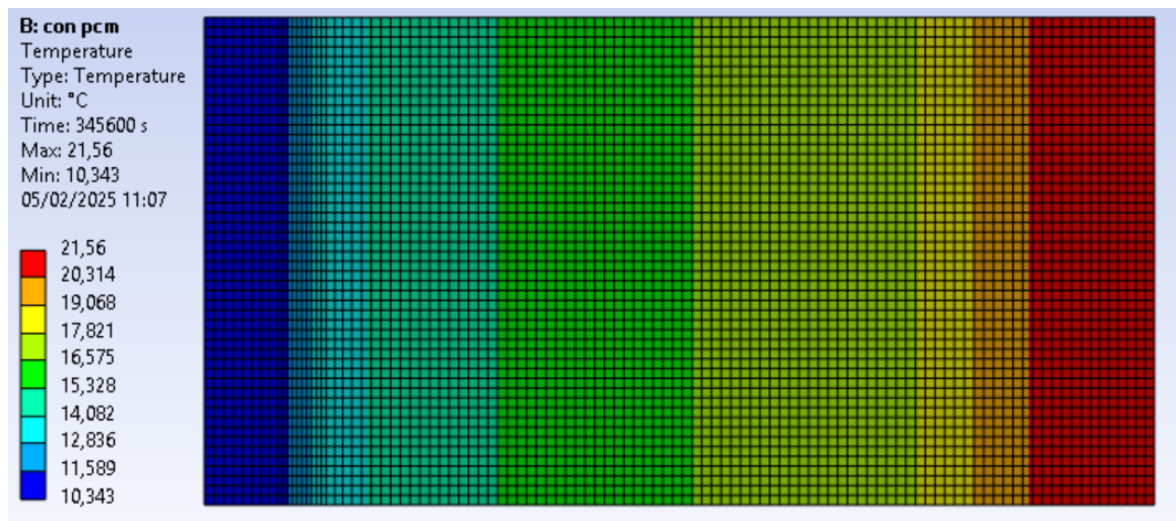


Figura 20.- Simulación de la temperatura en Solución 1.A en invierno

La Figura 20 representa la distribución del campo de temperaturas en la Solución 1.A, donde el PCM se encuentra hacia el exterior de la fachada, lo que se refleja en la región con el mallado más fino. La simulación evidencia el comportamiento de la transferencia de calor a lo largo de la superficie, con una escala de colores que indica las temperaturas en °C, desde las más bajas en azul hasta las más altas en rojo.

A continuación, en la Tabla 3 se muestran los resultados de todos los casos de estudio, detallando la oscilación térmica, amortiguación, la mejora porcentual en comparación a la solución tradicional y el desfase de la onda térmica.

PCM	Mes	Posición	Oscilación térmica (°C)	Amortiguación (%)	Mejora (%)	Desfase onda térmica (h)
PCM 15	Invierno	Exterior	0,777	96,06%	81,66%	6
		Interior	0,780	96,04%	81,59%	5
	Verano	Exterior	0,778	95,77%	81,37%	5
		Interior	0,778	95,77%	81,37%	5
PCM 20	Invierno	Exterior	0,763	96,13%	81,99%	6
		Interior	0,838	95,75%	80,22%	7
	Verano	Exterior	0,751	95,92%	82,02%	5
		Interior	0,751	95,92%	82,02%	5
PCM 25	Invierno	Exterior	0,778	96,05%	81,64%	6
		Interior	1,066	94,59%	74,84%	4
	Verano	Exterior	0,736	96,00%	82,38%	6
		Interior	0,736	96,00%	82,38%	5

Tabla 3-Resultados "solución 1"

En todas las configuraciones evaluadas, el uso de PCM ha demostrado una reducción significativa de la oscilación térmica interna en comparación con fachadas tradicionales, además de una mejora en la amortiguación, logrando en todos los casos una amortiguación superior al 90%. También, se ha observado un aumento en el desfase térmico, que varía entre 1 y 2 horas más que en la configuración tradicional en la mayoría de los escenarios analizados.

Entre todas las propuestas consideradas, se destaca que, para las condiciones climáticas de invierno, la solución óptima es emplear PCM 20 instalado hacia el exterior (Solución 1.A). Esta configuración ha permitido reducir la oscilación térmica interna de 4,2 °C a 0,8 °C, al mismo tiempo que se logra incrementar el desfase temporal en una hora adicional. Para el verano, la mejor opción identificada ha sido el uso del PCM 25, también instalado en el exterior de la envolvente. Esta configuración amortigua la oscilación térmica en un 96% y ha aumentado el desfase temporal en aproximadamente dos horas, como se detalla en las Tablas 2 y 3. Estos resultados son coherentes, dado que en invierno se requiere un PCM con una temperatura de transición de fase más baja (20°C en este caso), lo que resulta adecuado para climas más templados donde se desea mantener una temperatura interior constante y más baja. Por otro lado, el PCM 25, con una temperatura de fusión de 25°C, se emplearía en climas más cálidos, es decir, en verano, ya que ayuda a mantener una temperatura interior más confortable durante los meses más calurosos.



A pesar de que estas son las mejores opciones para cada una de las condiciones climáticas, la idea es seleccionar un solo tipo de PCM para su instalación en un lado de la envolvente. En este caso, dado que todas las opciones permiten estabilizar la temperatura y reducir la transferencia de calor, mejorando así el confort térmico interior, se opta por el uso del PCM 20 hacia el exterior.

La climatología de Gijón es generalmente fresca durante todo el año, con inviernos fríos y veranos moderados. Por esta razón, es más beneficioso utilizar el PCM 20 en la zona más cercana al exterior, ya que su temperatura de transición de fase más baja es ideal para mantener el confort interior en invierno, cuando es más necesario. Durante el verano, el clima de Gijón no suele ser lo suficientemente caluroso como para requerir el uso intensivo de un PCM con una temperatura de fusión más alta. Por lo tanto, el PCM 20 hacia el exterior proporcionará una mejora significativa en el confort térmico sin la necesidad de cambiar a un PCM diferente para el verano.

Con la solución seleccionada, se procede a una breve comparación entre la envolvente tradicional y la fachada con el PCM 20 instalado en el exterior. En la Tabla 4 se presenta dicha comparación de los resultados.

	Mes	Oscilación térmica (°C)	Amortiguación (%)	Desfase onda térmica (h)
<b>TRADICIONAL</b>	Invierno	4,237	78,50%	5
	Verano	4,176	77,30%	4
<b>PCM 20</b>	Invierno	0,763	96,13%	6
	Verano	0,751	95,92%	5

Tabla 4.-Comparativa solución tradicional frente a fachada con PCM 20 instalado en el exterior

En la Figura 21 se muestra la reducción de la oscilación térmica interna de la envolvente con PCM frente a la solución tradicional para el mes de febrero (invierno), y en la Figura 22 para el mes de agosto (verano).

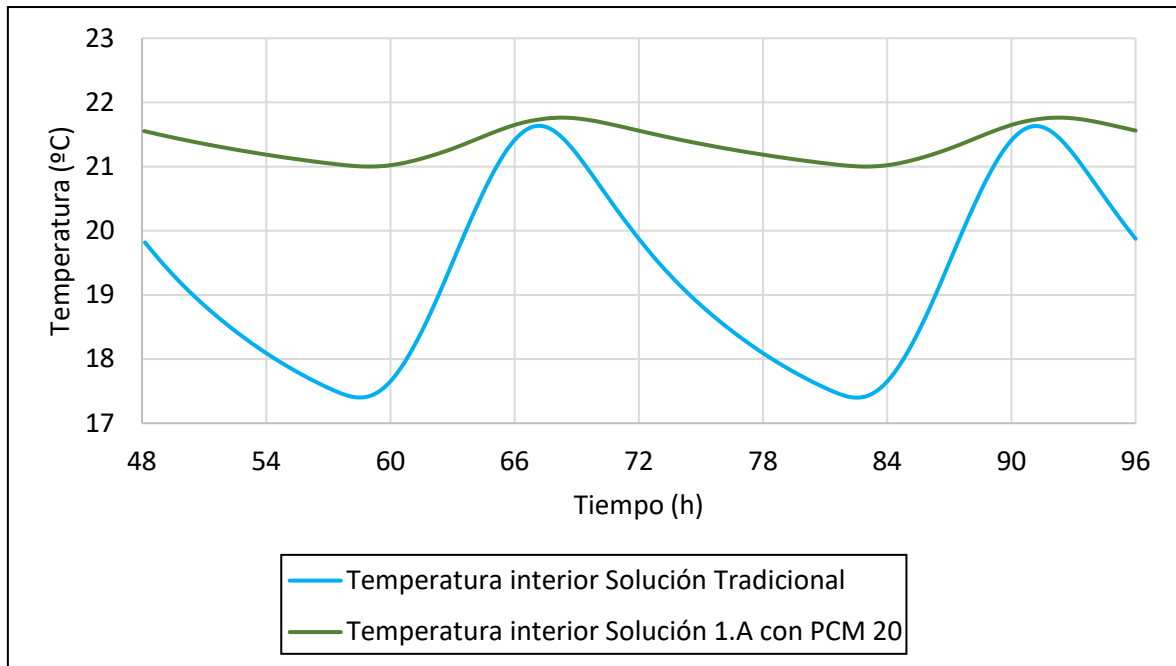


Figura 21.-Comparativa oscilación interna fachada tradicional y con PCM 20 hacia el exterior en invierno.

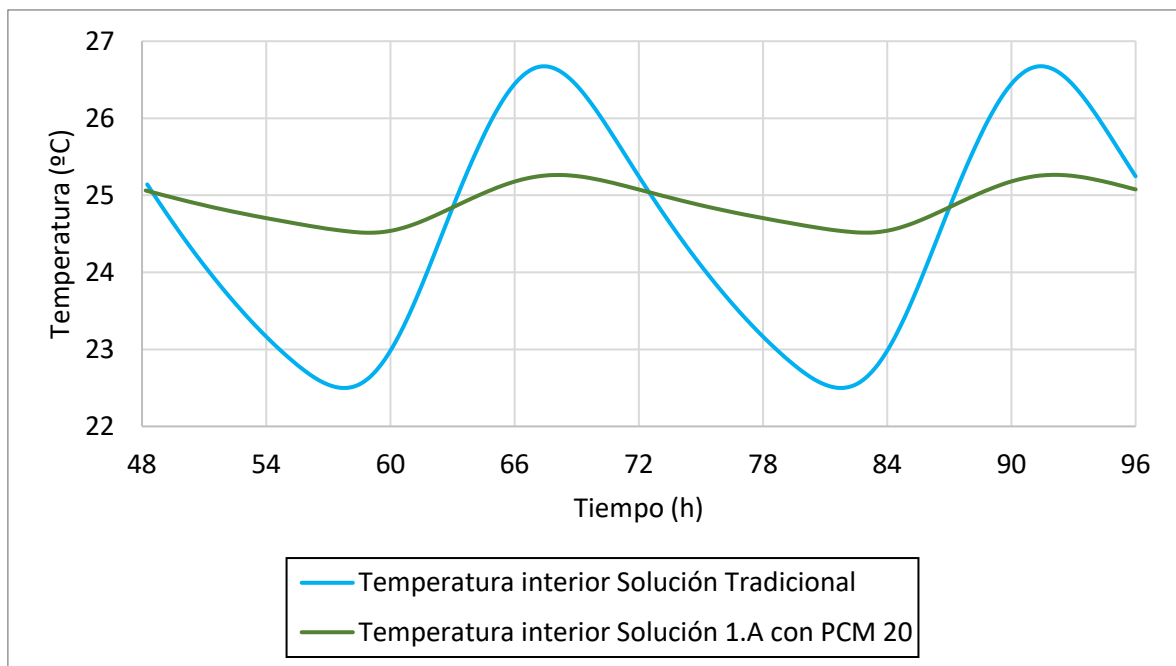


Figura 22.-Comparativa oscilación interna fachada tradicional y con PCM 20 hacia el exterior en verano.

### 6.3.- SOLUCIÓN 2

Se procede a optimizar la solución seleccionada mediante la reducción del espesor total de la envolvente. Actualmente, la fachada cuenta con un espesor de 195 mm e incorpora el PCM 20 hacia el exterior. El objetivo es reducir este espesor al mínimo posible, manteniendo una oscilación térmica interna comparable a la de una fachada tradicional. Para lograrlo, se reduce gradualmente la capa de aislante en incrementos de 10 mm, asegurando que esta disminución no comprometa el confort térmico interior deseado.

Tras sucesivas pruebas, se consigue reducir el espesor del aislante hasta 10 mm, que, sumados a los 10 mm de PCM, resultan en un espesor total de 165 mm para la envolvente. En la Figura 23 se observa dicha geometría final de la fachada optimizada.

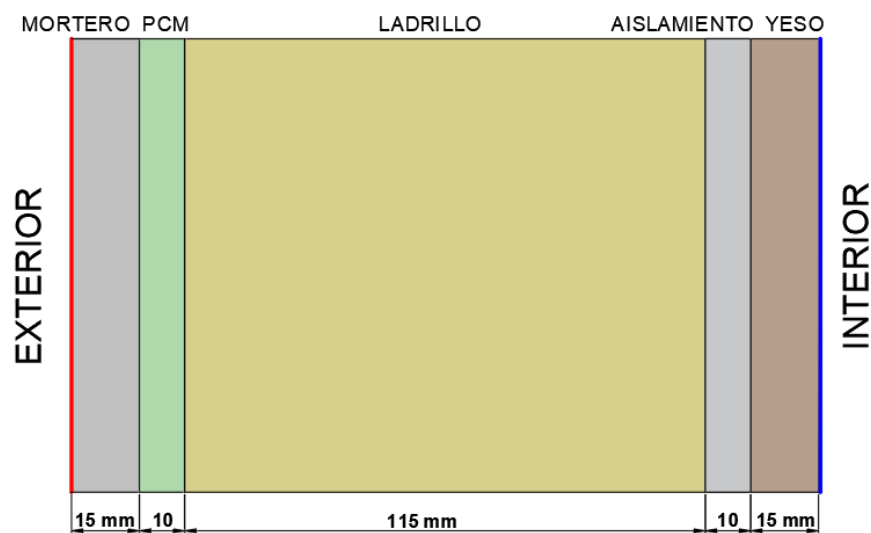


Figura 23.- Geometría fachada optimizada

En la Tabla 5 se muestran los resultados obtenidos después de esta reducción de espesor.

SOLUCIÓN	Mes	Espesor (mm)	Oscilación térmica (°C)	Desfase onda térmica (h)
PCM 20	Invierno	165	2,044	6
	Verano		2,087	4
TRADICIONAL	Invierno	195	4,237	5
	Verano		4,176	4

Tabla 5.-Comparativa resultados "solución 2" frente fachada tradicional

A pesar de reducir el espesor total de la fachada, se ha conseguido mantener una mayor estabilidad térmica, destacando que esta solución optimizada puede ofrecer un mejor rendimiento térmico con un menor espesor.

Para visualizar mejor el comportamiento térmico, en las Figura 24 y 25 se presentan las comparaciones gráficas de la oscilación térmica entre la solución tradicional y la versión optimizada, tanto para verano como para invierno.

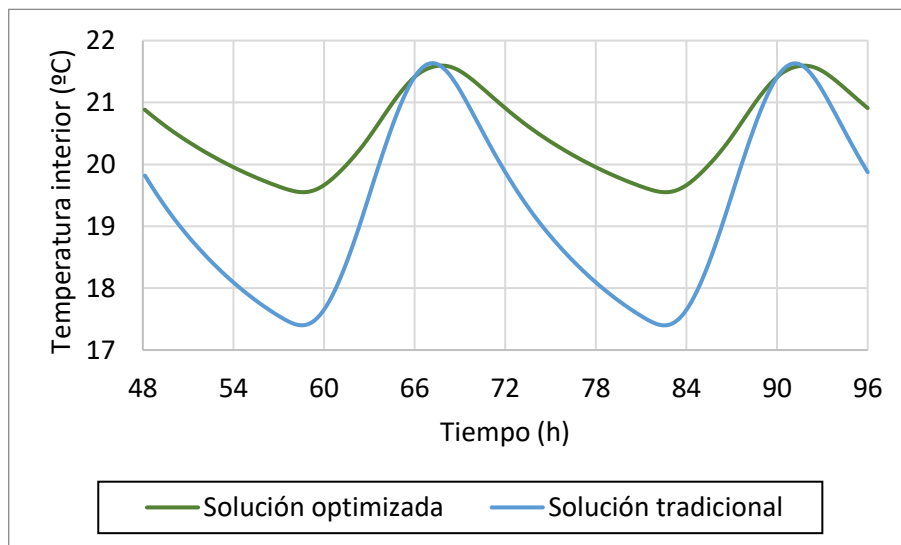


Figura 24.-Comparativa oscilación de la temperatura interna de la solución tradicional y la solución optimizada en invierno.

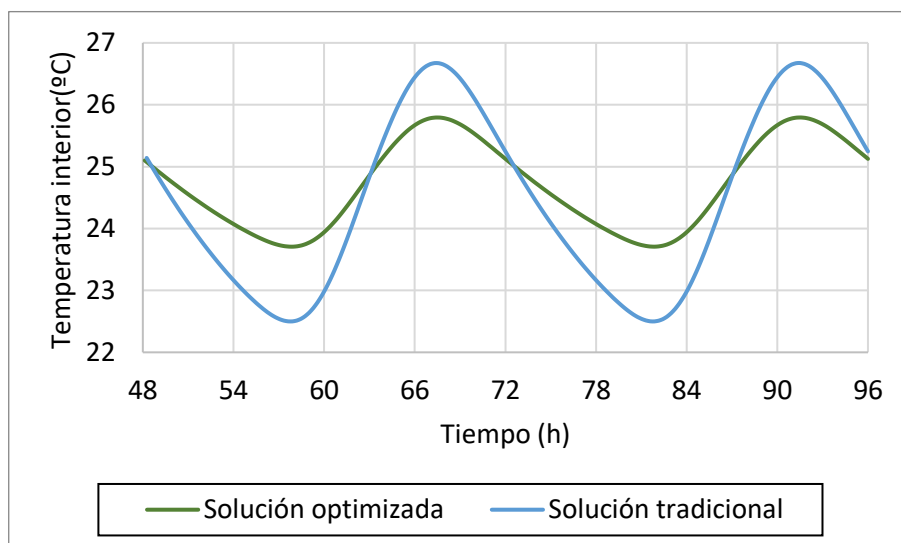


Figura 25.-Comparativa oscilación de la temperatura interna de la solución tradicional y la solución optimizada en verano.

## 7. Conclusiones

Teóricamente, la integración de PCM en fachadas activas representa una estrategia efectiva para optimizar la eficiencia energética y mejorar el confort térmico en comparación con las soluciones convencionales, es por ello que, en este estudio se ha investigado este concepto al analizar el comportamiento de cerramientos que incorporan PCM. Utilizando el método de los elementos finitos para realizar simulaciones térmicas dinámicas, se ha podido comprender mejor como los PCM pueden regular la temperatura interna de un cerramiento y mitigar las variaciones térmicas externas.

Los resultados han demostrado que con la incorporación de PCM se puede conseguir aumentar la inercia térmica del cerramiento. Esto se comprueba al obtener, en la primera solución, que manteniendo el espesor original de la envolvente e introduciéndole el PCM, se reduce la oscilación térmica de la superficie interior tanto en verano como en invierno, además de aumentar el desfase térmico de la onda. Esto evidencia el hecho de que el aumento de la inercia térmica contribuye a estabilizar las temperaturas internas y aumentar por tanto el confort térmico interior.

Es importante destacar que la elección del PCM y su posición en la envolvente son aspectos a tener en cuenta a la hora de seleccionar la solución más efectiva. El tipo de PCM, representa el rango de temperaturas en las que se produce el cambio de fase, por lo que tiene que ser adecuado al clima y condiciones que se van a utilizar, o por el contrario no estará funcionando y no se apreciaría ninguna mejoría. Asimismo, la posición dentro del cerramiento también afecta su desempeño, ya que debe colocarse en áreas donde pueda realizar eficazmente el cambio de fase.

En este estudio se ha identificado que la mejor solución es emplear el PCM 20 instalado hacia el exterior de la envolvente, ya que, aunque todas las configuraciones simuladas muestran mejoras en el rendimiento térmico, esta opción se destaca como la más adecuada para las condiciones climáticas específicas de Gijón.

El PCM 20 tiene una temperatura de transición de fase más baja, especificada en 20°C, en comparación con la otra alternativa factible de usar el PCM 25 (con una temperatura de 25°C), lo que significa que comienza su cambio de fase a temperaturas más bajas, y con ello

el almacenamiento de energía térmica. Esta característica es particularmente beneficiosa en invierno, cuando las temperaturas externas son más frías y se necesita mayor capacidad de almacenamiento de energía térmica para mantener un confort térmico adecuado en el interior del edificio. En Gijón, que experimenta un clima generalmente más fresco a lo largo del año, esta capacidad de iniciar el proceso de almacenamiento de energía térmica a temperaturas más bajas es crucial para mantener condiciones interiores confortables.

Además, se ha logrado obtener una solución optimizada al reducir la capa de aislamiento y por ende el espesor total de la fachada sin comprometer el confort térmico interior. Esta solución no solo mejora la eficiencia energética del edificio, sino que también favorece un diseño arquitectónico más compacto y eficiente.

A pesar del potencial que presentan estos materiales, su incorporación en envolventes aún está en fase de investigación en el sector de la edificación, por lo que en este estudio no solo se ha buscado evidenciar los beneficios térmicos de los PCM, sino también abordar los desafíos como la efectividad de los PCM en contextos de construcciones reales. Esto destaca que estos materiales representan una solución innovadora y sostenible para la construcción de edificios energéticamente eficientes y confortables.

Por último, hay que destacar que el desarrollo de una metodología efectiva para identificar los materiales de cambio de fase adecuados y determinar su ubicación óptima, es fundamental para garantizar un buen comportamiento térmico en los edificios. En este estudio, se utiliza el método de elementos finitos, una herramienta poderosa y versátil, para investigar estas soluciones innovadoras. Sin esta metodología, modelar y simular el comportamiento térmico de estructuras complejas que incorporan PCM sería mucho más difícil. Gracias al método de elementos finitos, no solo se ha podido seleccionar los PCM más adecuados en función de su temperatura de transición de fase, sino también determinar la ubicación óptima dentro de la envolvente, por lo que ha demostrado ser una herramienta indispensable para avanzar en el diseño de envolventes energéticamente eficientes y confortables, adaptadas a las condiciones climáticas específicas de cada región.

## 8. REFERENCIAS

- [1] “Ahorro de energía: medidas de la UE para reducir el consumo energético | Temas | Parlamento Europeo.” Accessed: Jul. 11, 2024. [Online]. Available: <https://www.europarl.europa.eu/topics/es/article/20221128STO58002/ahorro-de-energia-medidas-de-la-ue-para-reducir-el-consumo-energetico>
- [2] P. García García, “Estudio de las fachadas activas en la edificación,” 2017. [Online]. Available: [https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/68327/1/Estudio\\_de\\_las\\_fachadas\\_activas\\_en\\_la\\_edificacion\\_GARCIA\\_GARCIA\\_PAULA.pdf](https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/68327/1/Estudio_de_las_fachadas_activas_en_la_edificacion_GARCIA_GARCIA_PAULA.pdf)
- [3] M. Álvarez Rodríguez, I. María, S. Ramón, and A. Martínez, “Modelo Numérico y Análisis Térmico de Fachadas Activas Desarrolladas con Paneles PCM.”
- [4] “Materiales con cambio de fase PCM - Polímeros termoplásticos, elastómeros y aditivos.” Accessed: Apr. 10, 2023. [Online]. Available: <https://www.mexpolimeros.com/etp/pcm.html>
- [5] “About phase change materials | Croda Industrial Specialties.” Accessed: Sep. 04, 2024. [Online]. Available: <https://www.crodaindustrialspecialties.com/en-gb/functions/phase-change-materials/about-phase-change-materials>
- [6] I. Assi *et al.*, “Using phase change material in heat sinks to cool electronics devices with intermittent usage,” *2017 IEEE 7th International Conference on Power and Energy Systems, ICPEs 2017*, vol. 2017-December, pp. 66–69, Dec. 2017, doi: 10.1109/ICPEsYS.2017.8215922.
- [7] Haverland, “¿Qué es la inercia térmica?” Accessed: Apr. 13, 2023. [Online]. Available: <https://haverland.com/2015/01/21/que-es-la-inercia-termica/>
- [8] Paula Serrano Yuste, “La inercia térmica en la construcción de edificios eficientes.” Accessed: Apr. 13, 2023. [Online]. Available: <https://www.certificadosenergeticos.com/inercia-termica-construccion-edificios-eficientes>

- [9] Eduardo Martín del Toro, “Sustentable & Sostenible: Amortiguamiento y desfase térmico.” Accessed: Jun. 29, 2024. [Online]. Available: <https://blog.deltoroantunez.com/2019/07/amortiguamiento-y-desfase-termico.html>
- [10] “Aplicaciones de los materiales de cambio de fase en la construcción.” Accessed: Apr. 12, 2023. [Online]. Available: <https://www.cosasdearquitectos.com/2017/11/pcm-materiales-de-cambio-de-fase-construccion/>
- [11] “Materiales de cambio de fase para mejorar la eficiencia energética de edificios.” Accessed: Apr. 12, 2023. [Online]. Available: <https://www.certificadosenergeticos.com/materiales-de-cambio-de-fase-mejorar-eficiencia-energetica-edificios>
- [12] Angel Sánchez Inocencio, “Material de Cambio de Fase (PCM), Inercia térmica 100 veces más eficiente.” Accessed: Mar. 05, 2023. [Online]. Available: <https://www.activatie.org/publicacion?473>
- [13] S. Olivia Campos Maya, “Incorporación de PCM en Elementos Constructivos para la Mejora Energética,” 2010.
- [14] Manel da Silva, “Procesos avanzados para el desarrollo de materiales con PCM incorporados.” Accessed: Apr. 10, 2023. [Online]. Available: <https://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/63209-Procesos-avanzados-para-el-desarrollo-de-materiales-con-PCM-incorporados.html>
- [15] A. Oliver, F. J. Neila, and A. García-Santos, “Nota técnica: Clasificación y selección de materiales de cambio de fase según sus características para su aplicación en sistemas de almacenamiento de energíatérmica,” 2012. doi: 10.3989/mc.2012.58010.
- [16] “Ansys | Engineering Simulation Software.” Accessed: Jun. 06, 2024. [Online]. Available: <https://www.ansys.com/>
- [17] “Solución innovadora de rehabilitación energética de edificios protegidos utilizando materiales de cambio de fase macroencapsulados,” 2024.



- [18] “UNE-EN ISO 6946:2021 Componentes y elementos para la edificaci...” Accessed: Jun. 26, 2024. [Online]. Available: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0065066>
- [19] Berna, “Meteonorm (en).” Accessed: Jun. 06, 2024. [Online]. Available: <https://meteonorm.com/en/>