



**Universidad**  
Zaragoza

# Trabajo Fin de Máster

Evaluación energética de la integración de materiales de cambio de fase en la envolvente térmica de edificios residenciales

Energy assessment of the integration of phase change materials in the thermal envelope of residential buildings

Autora

**Rosana Blecua Arilla**

Director

**Ignacio Zabalza Bribián**

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

Máster en Energías Renovables y Eficiencia Energética

2022



# Evaluación energética de la integración de materiales de cambio de fase en la envolvente térmica de edificios residenciales

## **RESUMEN**

El sector residencial se considera intensivo y dominante en el consumo de energía y es responsable de gran parte de las emisiones totales de gases de efecto invernadero. Por lo general, dicho sector disminuye su consumo mediante el uso de aislamientos térmicos de alta calidad en la envolvente del edificio y de dispositivos de sombra en las ventanas para reducir la transferencia de calor entre el interior y exterior o, mediante un aumento en la eficiencia de los sistemas de climatización. Sin embargo, las mejoras en la eficiencia energética no deben limitarse a estos enfoques pues, el uso del almacenamiento de energía térmica pasiva en la envolvente del edificio representa una solución atractiva para mejorar la eficiencia energética y el confort térmico del edificio. Por ello, el objetivo del presente Trabajo Fin de Máster es analizar la potencialidad energética de aplicación de materiales de cambio de fase en la envolvente térmica de los edificios residenciales en un conjunto de escenarios, definidos a partir de la combinación de las siguientes variables:

- Periodos de construcción que definen las características constructivas introducidas con las actualizaciones de la normativa en materia energética de los edificios: 1981-2007, 2008-2019 y 2020-Actualidad.
- Tipologías de edificios residenciales: vivienda unifamiliar, bloque de viviendas de 3 plantas y bloque de viviendas de más de 3 plantas.
- Zonas climáticas representativas de España: Almería (zona climática A4), Valencia (zona climática B3), Barcelona (zona climática C2), Zaragoza (zona climática D3) y Burgos (zona climática E1).

El presente Trabajo Fin de Máster también tiene como objetivo comparar los ahorros energéticos proporcionados por esta solución frente a la solución convencional de aplicar aislamiento térmico en la envolvente del edificio. En aquellos casos en los que el ahorro proporcionado por el material de cambio de fase sea significativo frente al obtenido con el aislamiento térmico, se presentará un estudio económico básico con el propósito de mostrar realmente la viabilidad de este material innovador frente a una solución madura y fiable como es la del aislante térmico.

Actualmente en el mercado hay gran variedad de materiales de cambio de fase. Sin embargo, sus aplicaciones reales en los edificios residenciales son escasas debido a que es necesario continuar con su investigación y desarrollo para alcanzar un uso óptimo y útil de éstos. La finalidad del presente Trabajo Fin de Máster es contribuir y profundizar en este desarrollo a partir de las conclusiones energéticas y económicas que se obtengan.

# ÍNDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS .....</b>	<b>1</b>
<b>2. REVISIÓN TEÓRICA DE LOS MATERIALES DE CAMBIO DE FASE Y SU INTEGRACIÓN EN LOS MUROS DE LOS EDIFICIOS .....</b>	<b>5</b>
2.1 Principio de funcionamiento .....	6
2.2 Propiedades y criterios de selección .....	7
2.3 Clasificación.....	8
2.4 Técnicas de integración.....	9
<b>3. MÉTODO Y JUSTIFICACIÓN DE PARÁMETROS Y ESCENARIOS APLICADOS .....</b>	<b>13</b>
3.1 Estándares y parámetros geométricos.....	14
3.2 Espesor, tipo y posición del PCM en el muro exterior .....	18
3.3 Temperatura de consigna de calefacción .....	23
3.4 Resumen de simulaciones .....	24
<b>4. DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS .....</b>	<b>26</b>
4.1 Vivienda unifamiliar .....	26
4.2 Bloque de viviendas de 3 Plantas .....	28
4.3 Bloque de viviendas de más de 3 Plantas .....	31
<b>5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS .....</b>	<b>35</b>
5.1 Caso de análisis 1 .....	36
5.2 Caso de análisis 2 .....	39
5.3 Caso de análisis 3 .....	40
5.3.1 Vivienda unifamiliar .....	40
5.3.2 Bloque de viviendas de 3 plantas.....	41
5.3.3 Bloque de viviendas de más de 3 plantas .....	42
<b>6. ANÁLISIS ECONÓMICO .....</b>	<b>44</b>
<b>7. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE TRABAJO.....</b>	<b>49</b>
<b>8. BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>51</b>
<b>9. ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>54</b>
<b>10. ÍNDICE DE TABLAS .....</b>	<b>56</b>

# 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

En los últimos años las necesidades energéticas de los edificios se han incrementado de manera significativa debido al aumento de la tasa de crecimiento de la población y a la mejora del nivel de vida de las personas [1]. A nivel global, el sector residencial es el consumidor de energía dominante con una participación del 35% del consumo total de energía final y representa más de un tercio de las emisiones (directas e indirectas) de gases de efecto invernadero en todo el mundo [Figura 1].

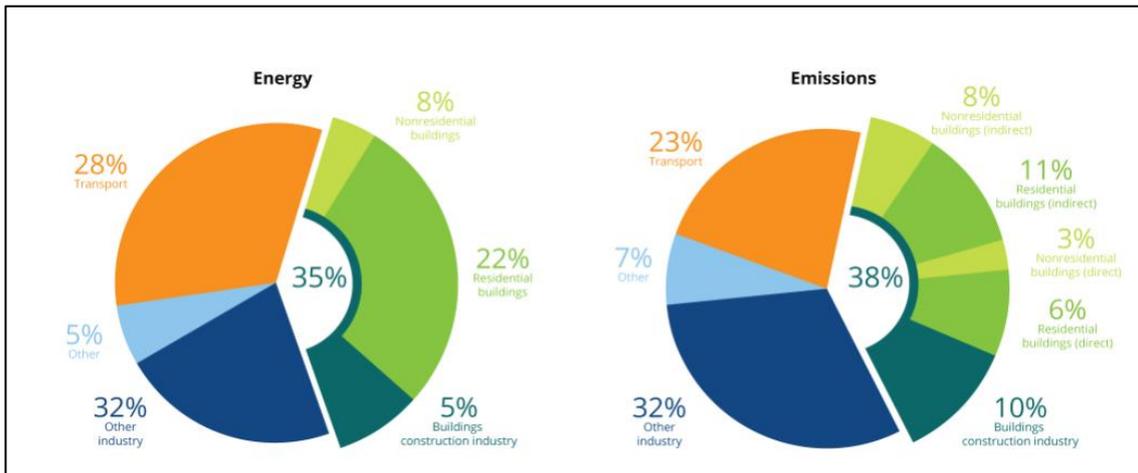


Figura 1. Porcentaje sectorial de consumo de energía final y emisiones a nivel global, 2019 [2].

Las emisiones indirectas que se muestran en la Figura 1 son las derivadas de la producción de electricidad y otras fuentes de energía destinadas a la actividad de los edificios.

En España, el consumo de energía final en los edificios residenciales en 2019 representaba casi el 17% del consumo total [Figura 2], considerando en este porcentaje los usos de calefacción, refrigeración, agua caliente sanitaria (ACS), cocina, iluminación y electrodomésticos, siendo el de calefacción el que mayor consumo representa por término medio con casi un 42% sobre el total de la vivienda [Figura 3].

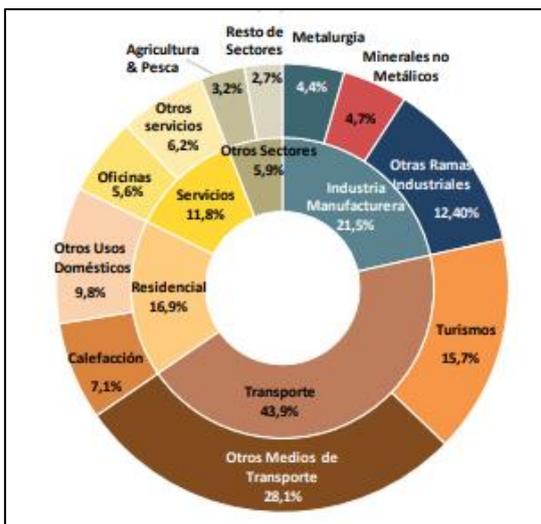


Figura 2. Estructura sectorial del consumo de energía final, 2019 [30].

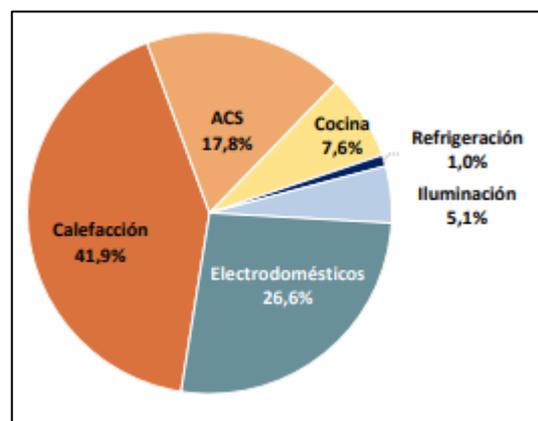


Figura 3. Estructura del consumo energético del sector residencial por usos finales, 2019 [30].

Habitualmente, tanto este consumo energético de calefacción como el consumo de refrigeración se disminuyen mediante el uso de aislantes térmicos de alta calidad en la envolvente del edificio y de dispositivos de sombra en las ventanas para reducir la transferencia de calor entre el interior y exterior o, mediante un aumento en la eficiencia de los sistemas de climatización. Sin embargo, las mejoras en la eficiencia energética no deben limitarse a estos enfoques.

El uso de almacenamiento de energía térmica pasiva en la envolvente del edificio presenta una solución atractiva para mejorar la eficiencia energética y el confort térmico del edificio y reducir tanto el consumo de energía como las emisiones de gases de efecto invernadero. Este fenómeno se puede implementar mediante el almacenamiento por calor sensible, aumentando y disminuyendo la temperatura de los recubrimientos del edificio. Durante siglos, el almacenamiento de calor sensible se ha utilizado en el sector de la construcción, pero requiere un gran volumen de material en comparación con el almacenamiento mediante calor latente. Este otro almacenamiento se da a temperatura constante y está asociado a la inclusión de materiales de cambio de fase. Estos materiales conducen a una mayor inercia térmica de la envolvente del edificio sin un aumento significativo del volumen del cerramiento proporcionando una menor frecuencia de fluctuación de la temperatura interior en el edificio, así como un desfase temporal con respecto a las fluctuaciones de la temperatura exterior [3].

El almacenamiento de energía térmica a partir de materiales de cambio de fase ha sido un tema de investigación relevante en los últimos años, atrayendo el interés de varios investigadores alrededor del mundo, en las más diversas áreas, debido a su capacidad para reducir las necesidades energéticas. La incorporación de PCM (Phase Change Material, por sus siglas en inglés) en los materiales de construcción ha dado lugar a la publicación de varios artículos en los últimos años. En la Figura 4 se puede observar el gran aumento del número de publicaciones a partir de 2011, lo que responde a las principales preocupaciones sobre el consumo de energía y la eficiencia energética en la edificación.

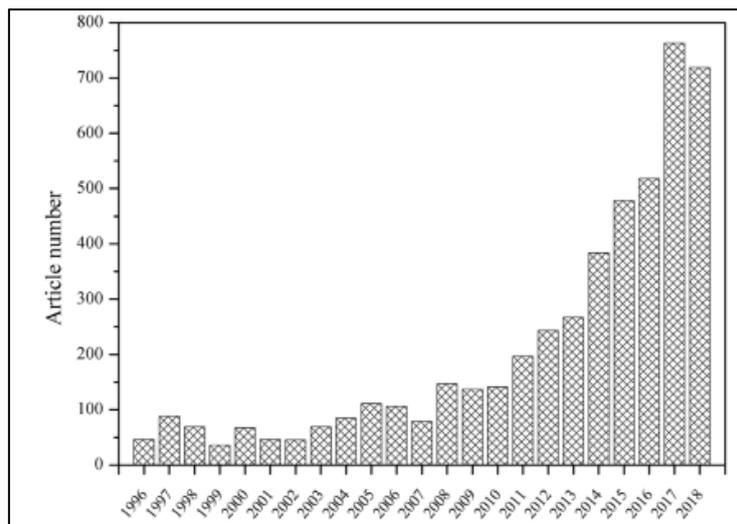


Figura 4. Número de artículos publicados sobre PCM entre 1996 y 2018 [1].

Existen diversas zonas del edificio en las que implementar el material de cambio de fase pues, este se puede integrar en el suelo, la pared, el techo, los forjados y, además, también puede formar parte de sistemas térmicos, como bombas de calor y paneles solares. En la Figura 5 se puede contemplar que la aplicación de materiales de cambio de fase en los muros exteriores del edificio genera un mayor interés en la comunidad científica. Dicha inclinación puede deberse a que los muros son el elemento constructivo con la mayor área de transmisión de calor del edificio.

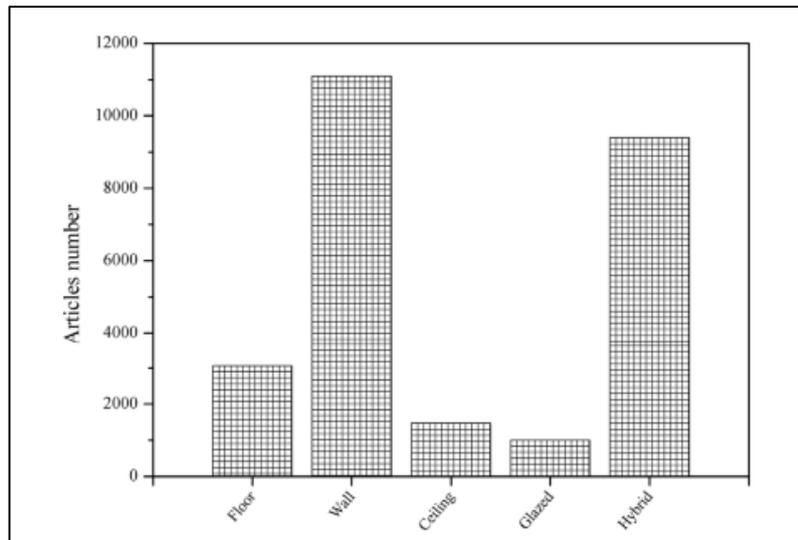


Figura 5. Número de publicaciones según la incorporación del PCM en los diferentes elementos constructivos [1].

El objetivo del presente Trabajo Fin de Máster es analizar la potencialidad de aplicación de materiales de cambio de fase en la envolvente de un conjunto de edificios residenciales de España de distinta forma, tamaño y año de construcción, ubicados en distintas zonas climáticas representativas y comparar dicha solución con la solución convencional de aplicar aislamiento térmico. El elemento constructivo de la envolvente en el que se estudiará la viabilidad de esta solución son los muros exteriores ya que, como se ha mostrado, es el elemento que más interés genera actualmente. En este trabajo también se contrastará el ahorro económico que presentaría dicha medida con la solución de considerar aislante térmico en aquellos escenarios en los que el material de cambio de fase proporcione ahorros energéticos más significativos.

Existen ya numerosos estudios que evidencian el ahorro energético que supone la integración de materiales de cambio de fase en los muros de un edificio. Sin embargo, en el presente trabajo se amplía significativamente el alcance de estos estudios al considerar el modelado y simulación de dicha solución constructiva en distintas tipologías de edificios, diversas zonas climáticas y, al confrontar los resultados con los que se obtendrían si se optase por implementar aislamiento térmico.

Tras la revisión bibliográfica realizada para el presente trabajo, se pudo concluir que en el mercado hay gran variedad de materiales de cambio de fase. Sin embargo, se trata de una solución poco madura y sus aplicaciones reales en los edificios residenciales son escasas debido a que es necesario continuar con su investigación y desarrollo para alcanzar un uso óptimo y

útil. Por ello, el presente Trabajo Fin de Máster pretende contribuir y profundizar en este desarrollo a partir de las conclusiones energéticas y económicas que se obtengan.

El presente documento se estructura en 7 apartados. Tras esta introducción [Apartado 1] en la que se han mostrado tanto los antecedentes que han llevado a desarrollar este Trabajo Final de Máster, como sus objetivos y alcance, en el Apartado 2, se resume y detalla la revisión teórica realizada sobre los materiales de cambio de fase y su implementación en los muros exteriores, con el fin de conocer y entender mejor su comportamiento. La obtención de los modelos que conformarán todos los casos de estudio requiere la elección de los parámetros que los definen y de los escenarios que se pretenden considerar. Las justificaciones del método seguido y del conjunto de decisiones adoptadas se presentan en el Apartado 3. Posteriormente, en el Apartado 4, se muestran y detallan todos los modelos que permitirán simular el conjunto de casos de estudio. Finalmente, se efectúa un análisis y discusión de los resultados obtenidos, a nivel energético [Apartado 5] y económico [Apartado 6] y, se recapitulan las conclusiones del trabajo [Apartado 7]. También se señalan las posibles líneas futuras de aquellos aspectos que hubieran resultado muy interesantes para desarrollar pero que superaban los límites del alcance del presente proyecto.

## 2. REVISIÓN TEÓRICA DE LOS MATERIALES DE CAMBIO DE FASE Y SU INTEGRACIÓN EN LOS MUROS DE LOS EDIFICIOS

En este apartado se resume una revisión de la literatura existente sobre los PCM y su integración en los muros de un edificio. Se describirá su principio de funcionamiento, los tipos existentes y sus principales características y criterios de selección para este ámbito de aplicación. Además, también se detallarán las técnicas de integración de éstos en las paredes del edificio.

El sector de la construcción es uno de los que más beneficios puede obtener de la utilización de los PCM ya que la temperatura interior de un edificio depende de las condiciones exteriores, interiores y de las características térmicas de la edificación, como la inercia térmica de los materiales, que tiene el efecto mostrado en la Figura 6.

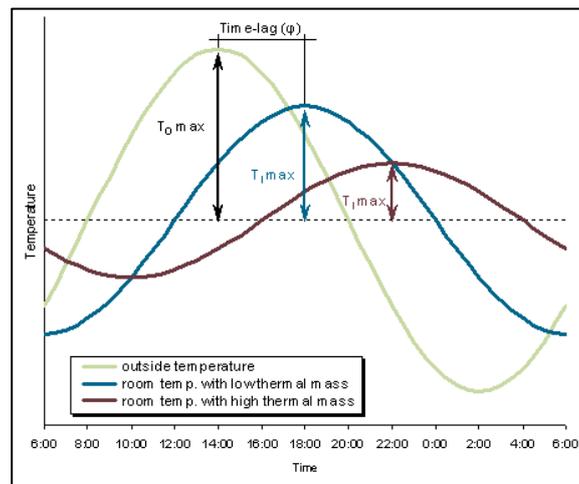


Figura 6. Efecto de la inercia térmica en la temperatura interior del edificio [4].

En la figura anterior se evidencia la estabilización de la temperatura interior de un edificio y el desfase temporal entre las ondas de temperatura exterior e interior por el efecto de la inercia térmica de los materiales de la envolvente.

La introducción de materiales de cambio de fase puede aumentar la inercia térmica del edificio sin aumentar mucho el peso de los cerramientos. Durante este proceso de cambio de fase, la cantidad de calor que absorbe el material se conoce como entalpía de cambio de fase. La Figura 7 presenta una comparación de los espesores necesarios en diferentes materiales para obtener la misma capacidad de almacenamiento de térmico:

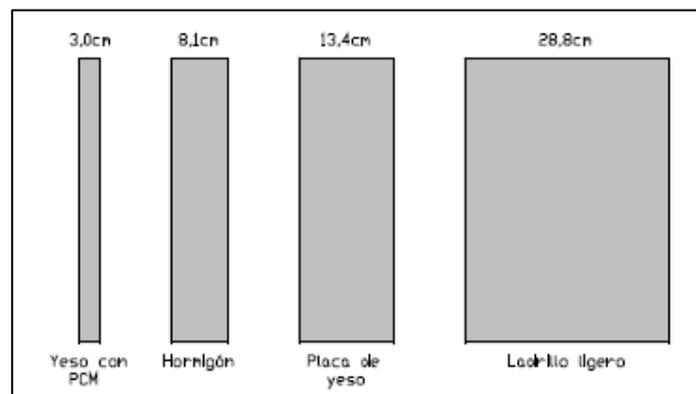


Figura 7. Comparación capacidad de almacenamiento de PCM con materiales construcción [5].

De este modo, queda reflejado cuál es la ventaja de los PCM en la edificación: el uso del calor latente que está disponible durante el proceso de cambio de fase.

## 2.1 Principio de funcionamiento

El principio de funcionamiento de los PCM en la envolvente de un edificio es simple. A medida que aumenta la temperatura, el material cambia de fase sólida a líquida absorbiendo calor. De manera similar, cuando la temperatura disminuye, el material cambia su fase de líquido a sólido liberando calor. De este modo, cuando este proceso de cambio de fase ocurre a una temperatura de entre 19-27°C, el material contribuye a aumentar el confort térmico porque ayuda a mantener la temperatura interna dentro de este rango. Durante el día, cuando hay demasiadas ganancias de radiación solar, el material cambia su fase de sólido a líquido, absorbiendo calor y evitando un aumento significativo de la temperatura interior. Por la noche, cuando la temperatura exterior baja, el material cambia su fase de líquido a sólido, liberando calor y amortiguando una bajada significativa de temperatura en el interior [6].

En la Figura 8 se muestran los cambios de fase experimentados por los PCM y, cómo el uso del calor latente que está disponible durante su proceso de cambio de fase les permite absorber/liberar mayores cantidades de energía térmica que los materiales convencionales de construcción, los cuales solo tienen la capacidad de almacenar energía mediante su calor sensible.

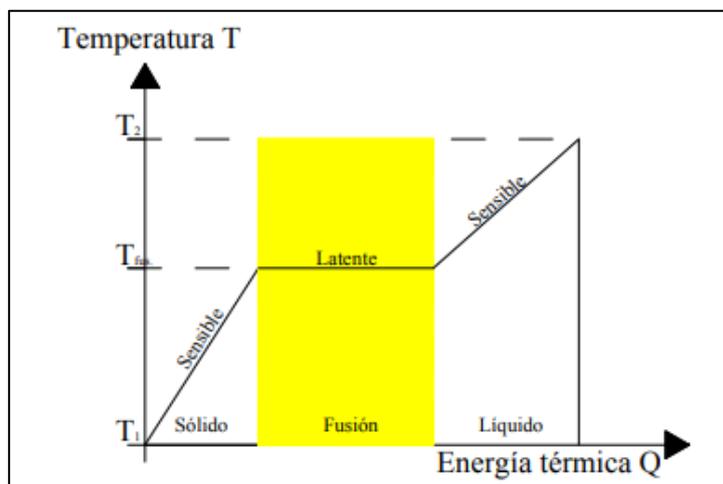


Figura 8. Energía térmica almacenada en el material frente a temperatura [5].

Según datos bibliográficos, los PCM son capaces de almacenar mediante su calor latente de 5 a 14 veces más energía por unidad de volumen que los materiales de almacenamiento de calor sensible [7]. Para aprovechar esta gran capacidad de almacenamiento, la temperatura ambiente de confort deseada debe estar cerca de la temperatura de cambio de fase, de lo contrario, el PCM solo almacenará calor sensible [8].

En aplicaciones de construcción y especialmente para su integración en muros exteriores, solo se utilizan los PCM sólido-líquido ya que, aunque la cantidad de energía almacenada es inferior que en el cambio de fase sólido-gas, la variación de volumen es menor [3].

## 2.2 Propiedades y criterios de selección

A continuación, se describen las propiedades más relevantes que definen a un PCM. A partir de estas propiedades se especifican los criterios de selección que se deben tener en cuenta para obtener un resultado favorable de la integración del PCM en la envolvente del edificio.

### a) Propiedades termodinámicas.

- Temperatura de cambio de fase. Tal y como se ha especificado en el punto anterior, este parámetro está fuertemente relacionado con la temperatura de confort, es decir, con la temperatura de consigna de calefacción establecida en la vivienda. Para obtener una funcionalidad útil del PCM, es necesario ajustar la temperatura de consigna de calefacción con la temperatura de cambio de fase del PCM. En el Apartado 3.3 de este documento, se detalla y justifica la temperatura de consigna de calefacción tomada para el estudio.
- Densidad de almacenamiento de energía. Es la energía absorbida o liberada por la sustancia al cambiar de fase (calor latente) por unidad de volumen. Este parámetro debe ser alto para absorber/liberar más energía térmica durante los procesos de fusión/solidificación.
- Calor específico. Es la cantidad de calor que hay que suministrar a una unidad de masa de esa sustancia para elevar su temperatura en una unidad. Conviene que este parámetro sea elevado para proporcionar calor sensible adicional significativo.
- Conductividad térmica. Propiedad física de los materiales, que mide la capacidad de conducción del calor. Es beneficioso que dicho parámetro sea alto ya que facilitará la transferencia de calor, favoreciendo así la absorción y liberación de calor por parte del PCM. Esta propiedad se considera como la principal desventaja de los PCM ya que generalmente tienen baja conductividad térmica. Este problema provoca cargas y descargas parciales durante la transición de fase, lo que influye en la capacidad de almacenamiento del PCM en el siguiente ciclo. Se ha investigado experimentalmente este problema utilizando diferentes métodos, como el uso de materiales de encapsulación de alta conductividad térmica, la inmersión de nanopartículas y la implementación de aletas. Sin embargo, se necesitan más investigaciones experimentales sobre la adopción de estas u otras técnicas [3], [9], [10].

### b) Propiedades químicas

- Los ciclos de solidificación/fusión deben presentar una completa reversibilidad.
- La degradación después de un elevado número de ciclos de fusión/solidificación debe ser mínima.
- Es conveniente que el PCM tenga compatibilidad química con los materiales con los que esté en contacto.
- No inflamable, no corrosivo, no tóxico y no explosivo [3], [9].

c) Propiedades cinéticas

- Se pretende una baja variación de volumen en el cambio de fase.
- Fusión congruente del material con cada ciclo de solidificación/fusión, con el mínimo sub-enfriamiento. El sub-enfriamiento, es decir, el proceso de bajar la temperatura de un líquido por debajo de su punto de congelación sin volverse sólido, así como la segregación pueden afectar fuertemente el rendimiento de los PCM [3], [9].

Además de las propiedades expuestas anteriormente, hay que considerar que la viabilidad técnica y económica de los PCM [3],[11] está fuertemente relacionada con la disponibilidad en grandes cantidades a bajo costo de estos materiales.

### 2.3 Clasificación

En general, los PCM se pueden clasificar en función de su variación de estado físico. Tal y como se ha especificado previamente, para aplicaciones de construcción y especialmente para su integración en los muros, solo se utilizan PCM sólido-líquido y están disponibles en el mercado con una amplia gama de temperaturas de cambio de fase. Este tipo de PCM se clasifica en las siguientes tres categorías según su composición química: orgánicos, inorgánicos y eutécticos [3].

a) PCM orgánicos

Los PCM orgánicos destacan por su adecuada temperatura de cambio de fase, alta densidad de almacenamiento, características químicas y térmicas estables y por su abundancia [3]. En la Tabla 1 se presentan sus principales ventajas y desventajas.

Ventajas	Desventajas
Disponible en una amplia gama de temperaturas y especialmente en el rango de temperatura de confort (18°C–26°C)	Conductividad térmica baja, alrededor de 0,2 W/mK
Fusión congruente, sin segregación de fases	Incompatible con algunos materiales de envase, por ejemplo, envases de plástico.
No sufren subenfriamiento	Inflamable
Estabilidad a largo plazo	
Compatible con la mayoría de los materiales de construcción	
Transición de fase con un pequeño cambio de volumen	
Reciclable	

Tabla 1. Características de los PCM orgánicos [1],[3].

### b) PCM inorgánico

El principal tipo de PCM inorgánico integrado en las paredes de los edificios durante los últimos diez años son las sales hidratadas. En la Tabla 2 se muestran las ventajas y desventajas de estos tipos de materiales.

<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Alta densidad de almacenamiento en comparación con los PCM orgánicos	Susceptible al subenfriamiento
Alta conductividad térmica (casi el doble que la de los PCM orgánicos)	Corrosivo
Compatible con recipientes de plástico	Transición de fase con un cambio de volumen alto
No inflamable	Segregación de fases*

Tabla 2. Características de los PCM inorgánicos [1],[3].

\*Cuando el PCM se funde, se separa en dos fases distintas: una fase acuosa saturada y una sólida que generalmente es un hidrato inferior de la sal original. Debido a la diferencia de densidad, la fase sólida se sedimenta y se acumula en la parte inferior del recipiente y, a menos que se tomen medidas especiales, este fenómeno es irreversible, es decir que, durante la solidificación, la fase sólida es incapaz de combinarse nuevamente con la solución saturada impidiendo la formación del hidrato de la sal inicial, perdiendo paulatinamente sus propiedades [11].

### c) PCM eutécticos

Los PCM eutécticos se producen mediante la combinación de al menos otros dos PCM: mezcla de dos PCM orgánicos, de dos PCM inorgánicos o de un PCM orgánico más un PCM inorgánico. En comparación con los PCM orgánicos e inorgánicos, este tipo de material no se usa mucho en aplicaciones de construcción y, además, hay datos limitados disponibles sobre sus propiedades [3].

## 2.4 Técnicas de integración

La integración adecuada de los PCM en las paredes del edificio garantiza el confort térmico humano al reducir tanto las fluctuaciones como los picos de temperatura interior. Esta integración se puede lograr utilizando la técnica de incorporación directa, impregnación, encapsulaciones o estabilización del PCM.

### a) Incorporación directa

Esta técnica se considera la forma más fácil y económica de incorporar los PCM en las paredes de los edificios. El PCM generalmente se mezcla directamente con los elementos de construcción durante el proceso de fabricación [12]. Este modo de incorporación, por ejemplo, en el caso del cemento, no deberá afectar a la durabilidad del producto, a las propiedades mecánicas del producto mezclado, o al proceso de hidratación.

### b) Inmersión

Este método es más costoso que el modo tradicional de incorporación directa y se utiliza principalmente en materiales de construcción porosos (como placas de yeso, ladrillos o bloques de hormigón). Éstos se sumergen en el PCM fundido en caliente, que se absorbe y rellena los poros por capilaridad. Con este método se puede convertir un panel ordinario en un sistema con PCM aunque existen algunos inconvenientes como el tiempo necesario de inmersión, la pérdida de propiedades en los ciclos térmicos y la posibilidad de fugas [3].

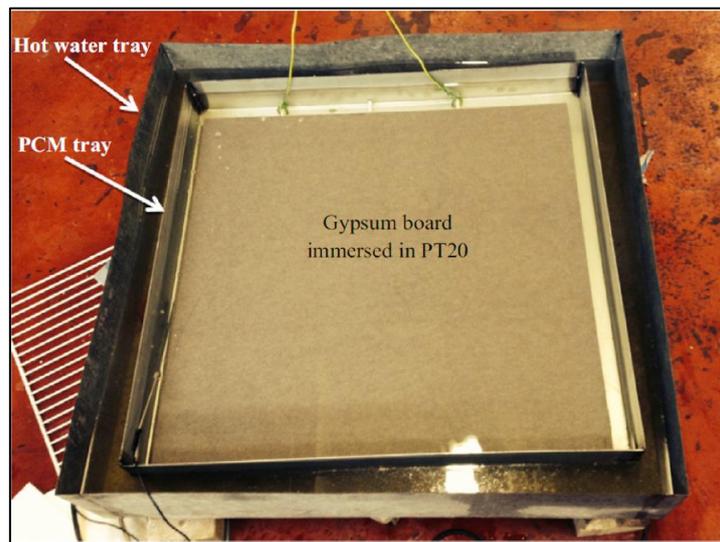


Figura 9. Inmersión de una placa de yeso en un PCM [3].

### c) Encapsulado

Para evitar la disminución del rendimiento y servicio de los materiales constructivos debido al contacto directo con los PCM, estos pueden encapsularse antes de ser incorporados con cualquiera de los dos métodos vistos previamente (incorporación directa o inmersión). Dicho encapsulamiento también favorece al control de los cambios de volumen experimentados por el PCM y conlleva un aumento del área de transferencia de calor. El encapsulamiento del PCM puede presentarse en forma de macroencapsulados o microencapsulados.

Los macroencapsulados consisten en el empaquetado del PCM en tubos, esferas, paneles u otros recipientes de gran tamaño, normalmente de más de 1 cm de diámetro que, posteriormente, se incorporan a los materiales de construcción [3].



Figura 10. Formas de macroencapsulación [3].

La microencapsulación es un proceso fisicoquímico que consiste en recubrir pequeñas partículas sólidas o líquidas con una cápsula sólida, generalmente un polímero. Las microcápsulas pueden ser esféricas o asimétricas, con un diámetro inferior a 1  $\mu\text{m}$ . Sin embargo, el diámetro común se encuentra entre 1 y 60  $\mu\text{m}$ . La ventaja de este proceso de encapsulación es la mejora de la transferencia de calor debido al incremento de la superficie de intercambio en proporción al volumen [3].

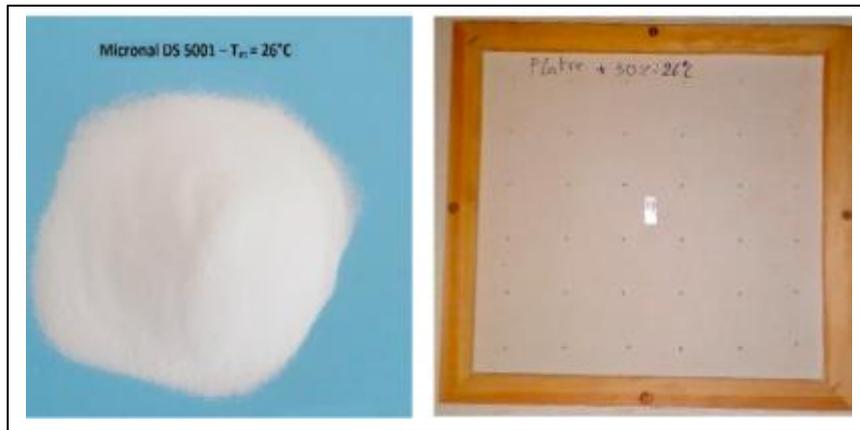


Figura 11. PCM microencapsulado (izquierda) y placa de yeso con PCM microencapsulado (derecha) [3].

#### d) Estabilización de forma

Teniendo en cuenta el riesgo de fuga del PCM en su fase líquida, varios investigadores han propuesto una nueva técnica, la estabilización de forma. En esta técnica, el PCM y el material de encapsulado se funden y se mezclan a una temperatura elevada para posteriormente enfriarse hasta que la mezcla se vuelva sólida.

En la actualidad, la técnica de incorporación de PCM más utilizada es la encapsulación [Figura 12], debido a la posibilidad de utilizar microencapsulación y macroencapsulación. Es importante señalar que el uso de la microencapsulación supone alrededor del 70% del trabajo realizado con la técnica de encapsulación mientras que, la macroencapsulación representa aproximadamente el 30%. Por otro lado, la incorporación directa y la estabilización de forma son las técnicas con menor número de trabajos publicados [1].

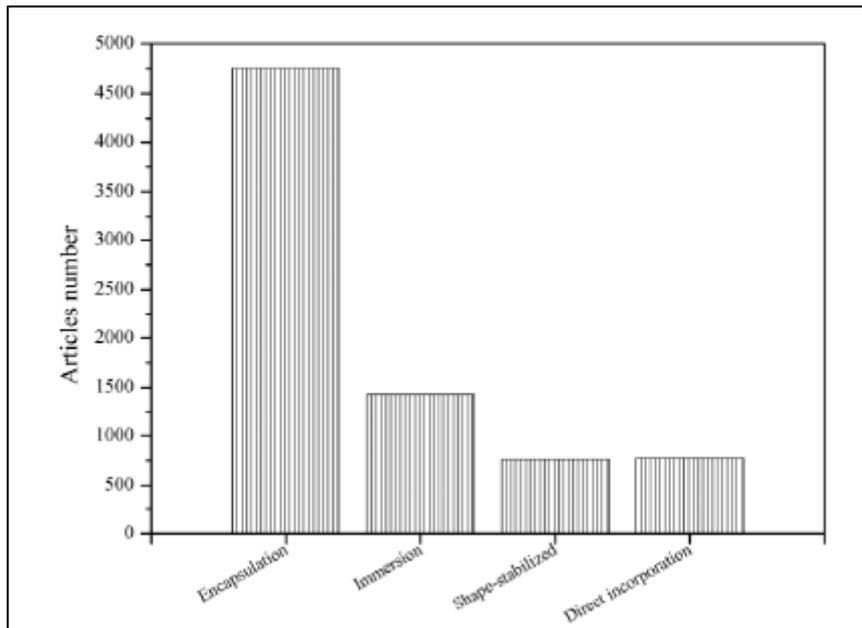


Figura 12. Utilización de técnicas de incorporación de los PCM [1].

### 3. MÉTODO Y JUSTIFICACIÓN DE PARÁMETROS Y ESCENARIOS APLICADOS

El presente trabajo estudia la potencialidad energética y viabilidad económica de la aplicación de materiales de cambio de fase en los muros exteriores de un conjunto de edificios residenciales con distintas características en función de su tipología y año de construcción y, ubicados en diferentes zonas climáticas de España.

La obtención de resultados que permite evaluar la eficiencia energética de los materiales de cambio de fase se ha realizado mediante el software DesignBuilder, utilizando el algoritmo de solución de diferencias finitas que permite analizar el comportamiento térmico variable de los PCM. En la herramienta, se introducen los parámetros que definen cada uno de los casos de estudio y se obtienen los diferentes resultados que, para el presente proyecto serán de interés las demandas de calefacción y refrigeración, los consumos de energía final de calefacción y refrigeración y las horas de desconfort térmico.

Para llevar a cabo el desarrollo y evaluación de este estudio, previamente ha sido necesario definir todos los escenarios, así como los parámetros que van a construir los distintos modelos. A continuación, se indican y justifican las decisiones, definiciones y cálculos previos a la conformación de los modelos y se presenta mediante la Figura 13 la metodología llevada a cabo para la realización del estudio.

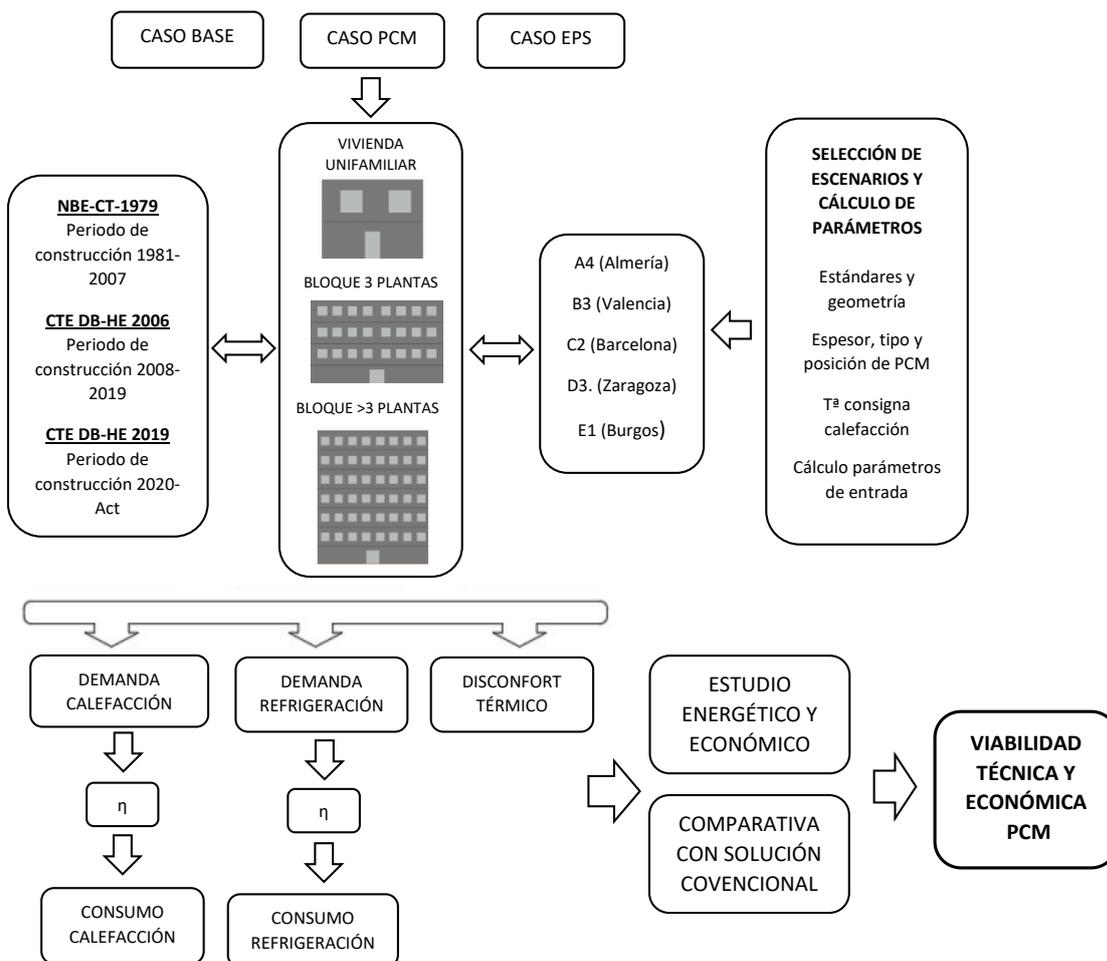


Figura 13. Metodología seguida en el estudio.

### 3.1 Estándares y parámetros geométricos

Para definir los distintos escenarios de estudio, así como sus parámetros geométricos, se recurre al informe “Segmentación del parque residencial de viviendas en España en clústeres tipológicos” [13] que realiza una segmentación a partir de los datos del último Censo de Población y Viviendas disponible, que corresponde al año 2011, atendiendo fundamentalmente al cruce de dos variables:

- a) Por un lado, si se trata de viviendas unifamiliares o edificios plurifamiliares, distinguiendo en estos últimos entre bloques de 3 plantas y bloques de más de 3 plantas.
- b) Por otro lado, sus períodos de construcción que corresponden a los principales cambios técnicos en los sistemas constructivos y/o en la normativa de la edificación: antes de 1940, 1941-1960, 1961-1980, 1981-2007 (edificios construidos en base a la NBE-CT79), 2008-2011 (edificios construidos en base al CTE DB-HE 2006).

De este modo, los clústeres definidos en el estudio de segmentación son los que se muestran en la Figura 14:

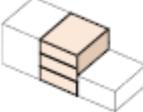
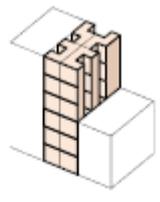
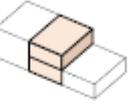
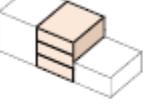
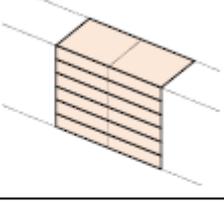
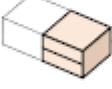
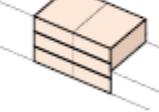
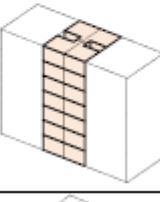
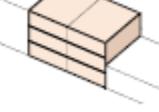
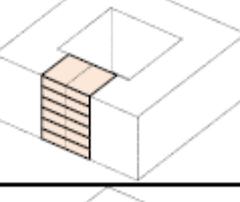
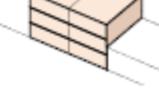
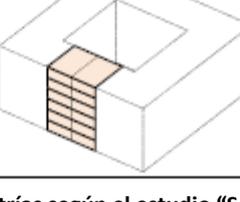
	Unifamiliar	Plurifamiliar	
		< 3 plantas	≥ 4 plantas
≤ 1940			
1941-1960			
1961-1980			
1981-2007			
2008-2011			

Figura 14. Matriz de definición de los clústeres de vivienda con volumetrías según el estudio “Segmentación del parque residencial de viviendas en España en clústeres tipológicos” [13].

En el presente proyecto no se han considerado todos los clústeres mostrados previamente ya que, en edificios construidos antes de la aplicación del NBE-CT79 no tiene sentido implementar una solución tan innovadora como la que se propone en este trabajo. En dichos edificios lo más común es comenzar a mejorar la eficiencia energética aplicando medidas más convencionales, como puede ser la implementación de aislantes térmicos o el cambio de vidrios y marcos. Por ello, en el proyecto se van a considerar los estándares construidos posteriormente al año 1981.

Además, en el estudio de segmentación no se incluyen los edificios construidos posteriormente al año 2011 ya que todavía no se ha actualizado dicho informe con el censo de 2021. Sin embargo, durante este periodo de tiempo, del 2011 a la actualidad, se han producido dos cambios en la normativa: CTE DB-HE 2013 (de 2014 a 2020) y CTE DB-HE 2019 (a partir de septiembre de 2020).

Así pues, además de descartar aquellos estándares en los que la solución de implementar materiales de cambio de fase en los muros exteriores no tiene coherencia, se incorpora el estándar de edificios construidos durante el periodo 2020-Act en los que aplica el CTE DB-HE 2019. Esta inclusión se ha realizado debido a que el CTE DB-HE 2019 establece unas condiciones mucho más exigentes que el resto de las normativas anteriores y es interesante y significativo estudiar el comportamiento de los PCM en este tipo de estándar actual. El periodo 2014-2019 se ha integrado dentro del periodo 2008-2019 debido a que las exigencias de las normativas que aplican en los distintos escenarios (2008-2013; 2014-2019) no son tan significativas como las que establece el CTE DB-HE 2019.

De este modo, los estándares definitivos considerados en el proyecto son los que se indican en la Tabla 3:

<b>Año de construcción</b>	<b>Normativa aplicada</b>
1981-2007	NBE-CT79
2008-2019	CTE DB-HE 2006
2020-Act	CTE DB-HE 2019

**Tabla 3. Estándares considerados en el estudio y normativa que les aplica.**

El estudio “Segmentación del parque residencial de viviendas en España en clústeres tipológicos” [13] también determina los parámetros que definen la geometría de cada uno de los clústeres considerados. Dichos parámetros son los que se indican a continuación en la Tabla 4:

Superficie media vivienda tipo (m <sup>2</sup> )
N.º de plantas del edificio
N.º de viviendas por planta
Relación Frente/Fondo (Edificio tipo)
Relación Frente/Fondo vivienda (Vivienda tipo)
Frente (Edificio tipo) (m)
% Medianeras en contacto con el exterior
Superficie total de fachada (m <sup>2</sup> )
Superficie de fachada opaca [incluyendo medianeras en contacto con el exterior] (m <sup>2</sup> )
Superficie de huecos en fachada (m <sup>2</sup> )
Superficie de medianera sin contacto con el exterior [considerada adiabática] (m <sup>2</sup> )
Superficie de solera (m <sup>2</sup> )
Superficie de cubierta (m <sup>2</sup> )

**Tabla 4. Parámetros geométricos que definen las características de los clústeres considerados en el estudio “Segmentación del parque residencial de viviendas en España en clústeres tipológicos” [13].**

Para definir estos parámetros geométricos, el estudio de segmentación ha partido de los datos geométricos de ejemplos reales seleccionados de cada clúster y, a partir de estos se han calculado los valores medios de las relaciones y proporciones que definen la volumetría y superficies del edificio tipo representativo de cada clúster, ofreciéndose los resultados por vivienda tipo (con la superficie media del clúster) y por 100 m<sup>2</sup>.

Con relación a las alturas, y dado que, según el estudio de segmentación no se dispone de datos más precisos al respecto, en todos los clústeres se ha supuesto una misma altura libre entre plantas de 2,6 m. Para los modelos geométricos del presente proyecto, a esta altura libre de planta se le han sumado los cantos de forjado correspondientes para los distintos casos considerados con el propósito de obtener la altura de suelo a suelo en cada uno de los casos y no considerar la misma para todos los casos (2,9 m) como se indica en el estudio de segmentación.

Para obtener la superficie total de huecos exteriores por vivienda, el estudio de segmentación ha utilizado una misma hipótesis aplicada a todos los clústeres: 13,5 m<sup>2</sup> de huecos para una vivienda de 100 m<sup>2</sup> (que corresponden aproximadamente a 4 ventanas de 1,3 m x 1,3 m, una de 1m x 1,2m, una puerta de 0,9 m x 2,1 m y un ventanal de 1,70 m x 2,1 m), calculando proporcionalmente dicha superficie a las viviendas de estudio consideradas en los clústeres [13].

En el presente proyecto se ha contemplado en los bloques de vivienda un recinto de 13 m<sup>2</sup> no habitable en cada una de las plantas para el hueco de ascensor y escalera. En el estudio de segmentación no se consideraba dicho espacio en esta tipología de edificios, pero siendo realista, se ha determinado que es un espacio que debe presenciarse. De este modo, en la tipología de bloque de vivienda, el presente proyecto difiere en pequeña medida de la superficie útil por vivienda que indica el estudio de segmentación.

Además de esta disparidad geométrica entre el proyecto y el estudio de segmentación en los bloques de vivienda, hay otra diferencia: se ha contemplado para esta tipología, una planta baja que integra las escaleras y el ascensor para acceder a las plantas superiores situada junto a un local no habitable. En el estudio de segmentación, la planta baja constaba únicamente de viviendas.

A continuación, se muestra un plano planta general (sin especificaciones de la distribución interior) de los distintos pisos que integran cada una de las tipologías de estudio: vivienda unifamiliar, bloque de viviendas de 3 plantas, bloque de viviendas de más de 3 plantas (los planos corresponden con el estándar 2008-2019, ya que para cada estándar y tipología las dimensiones geométricas varían).

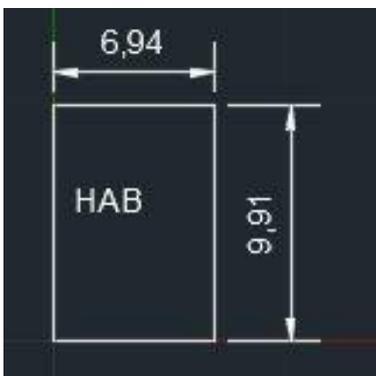


Figura 15. Plano planta general de los pisos en la vivienda unifamiliar

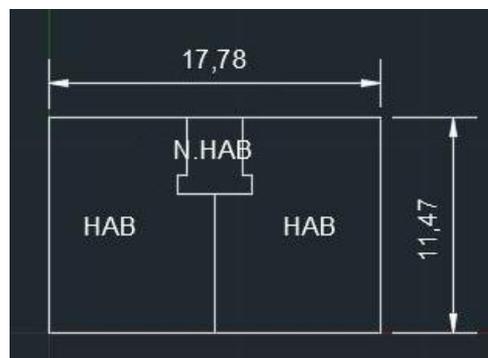


Figura 16. Plano planta general de los pisos en el bloque viviendas de 3 plantas.

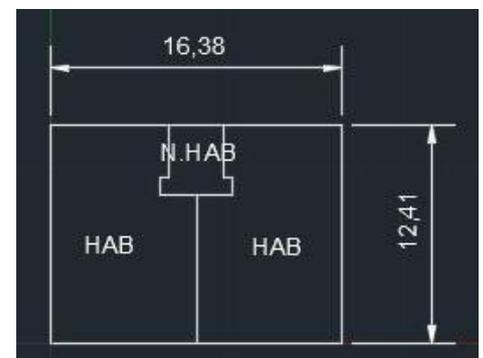


Figura 17. Plano planta general de los pisos en el bloque viviendas de más de 3 plantas.

Tal y como se ha indicado, los planos anteriores muestran un plano planta general de los pisos de las distintas tipologías. En el Apartado 4 del presente documento, se definen detalladamente todas las dimensiones geométricas y se presenta un modelado 3D de los distintos casos de estudio considerados.

### **3.2 Espesor, tipo y posición del PCM en el muro exterior**

Previamente a evaluar el ahorro energético que presentan los PCM en los muros exteriores de los edificios considerados mediante la herramienta DesignBuilder, se plantearon las siguientes cuestiones:

- Espesor óptimo del PCM.
- Tipo de PCM.
- Ubicación óptima del PCM en el cerramiento exterior.

Tras una revisión bibliográfica, se pudo comprobar que dichas cuestiones no estaban totalmente esclarecidas y no había una conclusión concordante ya que dependían notablemente del clima a la que estaba expuesta la solución [14], [15], [16].

Por ello, se decidió realizar una serie de simulaciones previas al estudio energético con el fin de obtener respuesta a estas cuestiones y justificar el tipo, espesor y ubicación de PCM seleccionados en los distintos modelos del proyecto. Como ya se ha comentado, dichos parámetros dependen notablemente del clima al que está expuesta la solución por lo que, para llevar a cabo las simulaciones que se describen posteriormente, se seleccionó un estándar y tipología concretos y se evaluaron dichos parámetros de interés para las distintas zonas climáticas de España que se definen a continuación:

En España se consideran cinco zonas climáticas según la severidad de invierno y de verano de cada ubicación geográfica. Para el presente trabajo, se escogen las ciudades más significativas y representativas de estas cinco zonas climáticas:

Almería: zona climática A4. Inviernos muy suaves y veranos muy severos.

Valencia: zona climática B3. Inviernos suaves y veranos severos.

Barcelona: zona climática C2. Inviernos medios y veranos suaves.

Zaragoza: zona climática D3. Inviernos severos y veranos severos.

Burgos: zona climática E1. Inviernos muy severos y veranos muy suaves.

El estándar y tipología seleccionado es el bloque de viviendas de 3 pisos construido durante el periodo 2008-2019 y, las simulaciones y resultados obtenidos son los que se detallan en los siguientes puntos:

- Ahorro en la demanda energética proporcionado por tres tipos diferentes de PCM en bloques de vivienda de 3 pisos construidos durante el periodo 2008-2019 para las cinco climatologías que definen las zonas de España.

Para seleccionar los tres tipos de PCM, se recurrió a una revisión bibliográfica con el fin de identificar qué tipo de materiales de cambio de fase eran los más utilizados en los estudios dedicados a la integración de esta solución en cerramientos de edificios [16]. A continuación, se identifican los PCM seleccionados:

- i) BioPCM M51/Q23: material de cambio de fase perteneciente al grupo de ácidos grasos (orgánico), el cual está siendo cada vez más estudiado y utilizado [17]. Este tipo de material está disponible en la base de datos del software DesignBuilder. El número que acompaña a la Q representa la temperatura de cambio de fase del material en °C y el número que acompaña a la M, la capacidad de almacenamiento térmico del material, es decir, la entalpía de cambio de fase en BTU/pie cuadrado.
- ii) RT 22HC: material de cambio de fase perteneciente al grupo de parafinas (orgánico). Este material no está disponible en la biblioteca del software DesignBuilder por lo que, para ingresar sus datos en la herramienta, se toma la ficha técnica del fabricante Rubitherm [18].
- iii) HS22: material de cambio de fase perteneciente al grupo de sales hidratadas (inorgánico). Este material no está disponible en la biblioteca del software DesignBuilder por lo que, para ingresar sus datos en la herramienta, se toma la ficha técnica del fabricante Pluss [19].

Para modelar e implementar el RT22HC y el HS22 en la biblioteca de DesignBuilder, la herramienta permite seleccionar entre dos métodos:

- i) Básico: se utiliza la misma curva de temperatura/entalpía tanto para la fusión como para la congelación.
- ii) Histéresis: los procesos de fusión y solidificación siguen diferentes curvas de temperatura/entalpía, lo que representa un efecto que se ve comúnmente en las aplicaciones reales de materiales de cambio de fase en envolventes de edificios [20].

En los casos en los que el material no estaba implementado en DesignBuilder y se contaba con la ficha técnica del fabricante, se ha modelado mediante el método de histéresis.

En la Tabla 5 se muestran las características termodinámicas propias de los PCM considerados:

		Conductividad térmica [W/mK]	Ce [J/kgK]	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	Entalpía de fusión [kJ/kg]	T <sup>a</sup> Cambio de fase [°C]	Modelado en DB
<b>BioPCM M51/Q23</b>	-	0,2	1970	235	123*	23	Básico
<b>RT22HC</b>	Sólido	0,2	2000	770	190	22	Histéresis
	Líquido	0,2	2000	700	190	22	
<b>HS22</b>	Sólido	1,13	2270	1651	162	22	Histéresis
	Líquido	0,56	2530	1540	190	23	

Tabla 5. Características de los PCM [18], [19].

\*Se ha realizado la conversión de BTU/pie cuadrado a kJ/kg

Para evaluar y comparar el potencial de los materiales, estos se han tomado con similar temperatura de cambio de fase (en consonancia con la máxima temperatura de confort para calefacción recomendada por el RITE: 23°C, Apartado 3.3) ya que se trata de un parámetro muy significativo para que el PCM funcione correctamente y ayude a aumentar el confort térmico.

A continuación, en la Tabla 6 se muestra el ahorro en la demanda térmica que proporciona cada uno de los materiales en el estándar y tipología seleccionado para las cinco zonas climáticas:

		CASO BASE	BioPCM M51/Q23	RT22HC	HS22
A4	Demanda de calefacción [kWh/año]	11.994,10	11.454,32	10.691,98	8.810,65
	Demanda de refrigeración [kWh/año]	8.901,02	8.518,92	8.436,17	8.158,96
	TOTAL DEMANDA [kWh/año]	20.895,12	19.973,24	19.128,15	16.969,61
	AHORRO [kWh/año]		921,88	1.766,97	3.925,51
	AHORRO [%/año]		4,41%	8,46%	18,79%
B3	Demanda de calefacción [kWh/año]	19.672,49	18.912,63	18.767,46	16.118,57
	Demanda de refrigeración [kWh/año]	8.826,46	8.544,39	8.445,33	8.142,06
	TOTAL DEMANDA [kWh/año]	28.498,95	27.457,02	27.212,79	24.260,63
	AHORRO [kWh/año]		1.041,93	1.286,16	4.238,32
	AHORRO [%/año]		3,66%	4,51%	14,87%
C2	Demanda de calefacción [kWh/año]	22.208,35	21.346,55	21.310,20	18.758,09
	Demanda de refrigeración [kWh/año]	5.942,09	5.827,19	5.755,49	5.167,08
	TOTAL DEMANDA [kWh/año]	28.150,44	27.173,74	27.065,69	23.925,17
	AHORRO [kWh/año]		976,70	1.084,75	4.225,27
	AHORRO [%/año]		3,47%	3,85%	15,01%
D3	Demanda de calefacción [kWh/año]	30.249,57	29.199,96	29.034,36	24.855,62
	Demanda de refrigeración [kWh/año]	5.664,00	5.561,99	5.475,44	4.590,42
	TOTAL DEMANDA [kWh/año]	35.913,57	34.761,95	34.509,80	29.446,04
	AHORRO [kWh/año]		1.151,62	1.403,77	6.467,53
	AHORRO [%/año]		3,21%	3,91%	18,01%
E1	Demanda de calefacción [kWh/año]	47.502,91	45.715,03	45.624,16	43.063,28
	Demanda de refrigeración [kWh/año]	1.043,45	797,91	782,03	398,36
	TOTAL DEMANDA [kWh/año]	48.546,36	46.512,94	46.406,19	43.461,64
	AHORRO [kWh/año]		2.033,42	2.140,17	5.084,72
	AHORRO [%/año]		4,19%	4,41%	10,47%

Tabla 6. Ahorro en la demanda térmica en función del tipo de PCM.

Como puede verse en los resultados, para las cinco tipologías de clima el HS22 proporciona unos mayores ahorros en la demanda térmica. Esto se debe principalmente a que es un material con una conductividad térmica bastante superior, lo que permite que la absorción y liberación de calor por parte de este sea mucho más sencilla. Aunque se trate de un material más susceptible al subenfriamiento y la segregación, lo que podría afectar fuertemente a su rendimiento, para el presente estudio se ha decidido que el material de cambio de fase considerado en todos los modelos sea el HS22 debido a los ahorros sustanciales que proporciona en la demanda frente a otros tipos de PCM.

- Ahorro en la demanda energética proporcionado por dos posiciones diferentes del PCM dentro del muro exterior en bloques de vivienda de 3 pisos construidos durante el periodo 2008-2019 para las cinco climatologías que definen las zonas de España.

La posición del PCM en el propio muro determina el alcance de su interacción con los ambientes interior y exterior. Cuando el PCM está ubicado cerca de la superficie de la pared exterior, interactúa de manera muy efectiva con el entorno exterior, pero no puede transferir de manera efectiva la energía almacenada al interior debido a la gran resistencia térmica del aislamiento

de la pared. Del mismo modo, cuando el PCM está ubicado cerca de la superficie de la pared interior, interactúa de manera efectiva con el interior, pero no puede utilizar de manera efectiva los beneficios de las oscilaciones diurnas que se dan en el ambiente exterior [21]. Por ello, se decidió comparar cuál de las siguientes dos posiciones del PCM en el propio cerramiento proporcionaba mayores ahorros en la demanda para las distintas zonas climáticas:

- i) PCM ubicado entre el enlucido interior de yeso y el tabique de ladrillo hueco sencillo: situación en la que el material de cambio de fase está ubicado cerca de la superficie de la capa del muro que da al interior [Figura 18].
- ii) PCM ubicado entre el aislante y el ladrillo perforado exterior: situación en la que el material de cambio de fase está ubicado cerca de la superficie de la capa del muro que da al exterior [Figura 19].

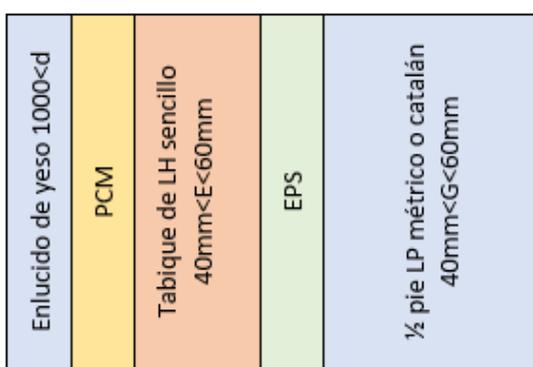


Figura 18. PCM lado interior cerramiento.

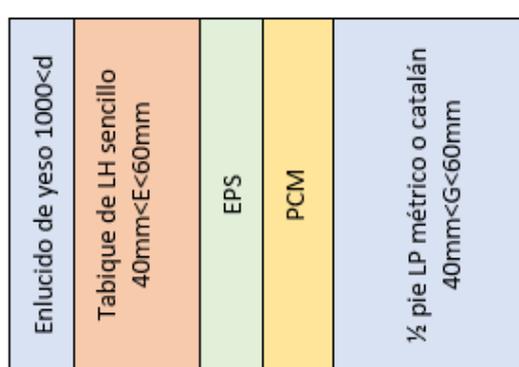


Figura 19. PCM lado exterior cerramiento

A continuación, en la Tabla 7 se muestra el ahorro en la demanda térmica que proporciona cada una de las posiciones del PCM consideradas en el cerramiento en el estándar y tipología seleccionados para las cinco zonas climáticas:

		Demanda Calefacción (kWh/año)	Demanda Refrigeración (kWh/año)	TOTAL (kWh/año)	AHORRO (kWh/año)	AHORRO (%/año)
A4	CASO BASE	11.994,10	8.901,02	20.895,12		
	INTERIOR	8.810,65	8.158,96	16.969,61	3.925,51	<b>18,79%</b>
	EXTERIOR	10.480,50	7.565,06	18.045,56	2.849,56	<b>13,64%</b>
B3	CASO BASE	19.672,49	8.826,46	28.498,95		
	INTERIOR	16.118,57	8.142,06	24.260,63	4.238,32	<b>14,87%</b>
	EXTERIOR	17.906,19	7.513,00	25.419,19	3.079,76	<b>10,81%</b>
C2	CASO BASE	22.208,35	5.942,09	28.150,44		
	INTERIOR	18.758,09	5.167,08	23.925,17	4.225,27	<b>15,01%</b>
	EXTERIOR	20.490,94	4.961,23	25.452,17	2.698,27	<b>9,59%</b>
D3	CASO BASE	30.249,57	5.664,00	35.913,57		
	INTERIOR	24.855,62	4.590,42	29.446,04	6.467,53	<b>18,01%</b>
	EXTERIOR	29.009,65	4.690,89	33.700,54	2.213,03	<b>6,16%</b>
E1	CASO BASE	47.502,91	1.043,45	48.546,36		
	INTERIOR	43.063,28	398,36	43.461,64	5.084,72	<b>10,47%</b>
	EXTERIOR	46.627,50	1.262,48	47.889,98	656,38	<b>1,35%</b>

Tabla 7. Ahorro en la demanda térmica en función de las diferentes posiciones del PCM en el cerramiento.

Como puede verse en los resultados, para las cinco tipologías de clima, la ubicación del PCM cerca de la pared interior proporciona unos ahorros mayores en la demanda. Por tanto, se concluye que, para los climas de España, el PCM generará mayores ahorros si se ubica en una posición óptima que le permita interactuar de manera efectiva con el entorno interior de la vivienda.

Estos resultados obtenidos se encuentran en concordancia con un estudio realizado en dos ciudades italianas de clima mediterráneo en las que, para ambos casos, la integración del PCM por el lado interno del cerramiento permitía obtener los mejores rendimientos energéticos [14].

- Ahorro en la demanda energética proporcionado por el espesor óptimo del PCM en el muro exterior de bloques de vivienda de 3 pisos construidos durante el periodo 2008-2019 para las cinco climatologías que definen las zonas de España.

A partir de las diferentes simulaciones realizadas, se ha comprobado que, a mayores espesores de la solución, mayores ahorros se producen de la demanda energética en todas las zonas climáticas. Sin embargo, esto supone también mayores inversiones.

Con el fin de obtener el espesor óptimo, se ha definido un intervalo común de espesores aplicados según la bibliografía consultada [14], [15]. Dicho intervalo considerado va desde 0 cm de PCM (caso base) hasta 6 cm de PCM tomando longitudes de intervalo de 1 cm. Finalmente y con el propósito de obtener este espesor óptimo, se ha seleccionado aquel espesor que produce un mayor porcentaje de ahorro con respecto al espesor previo del intervalo.

En la Figura 20 se visualiza gráficamente el ahorro en la demanda térmica que proporciona cada uno de los espesores en el estándar y tipología seleccionado para las cinco zonas climáticas. A partir de esta figura se evidencia que para las zonas climáticas A y B el espesor óptimo de PCM son 2cm, para la zona climática C el espesor óptimo son 3cm y, para las zonas climáticas D y E el espesor óptimo es de 5cm.

Como puede concluirse y, al igual que ocurre con el aislamiento térmico, existen espesores óptimos diferentes para las diversas zonas climáticas.

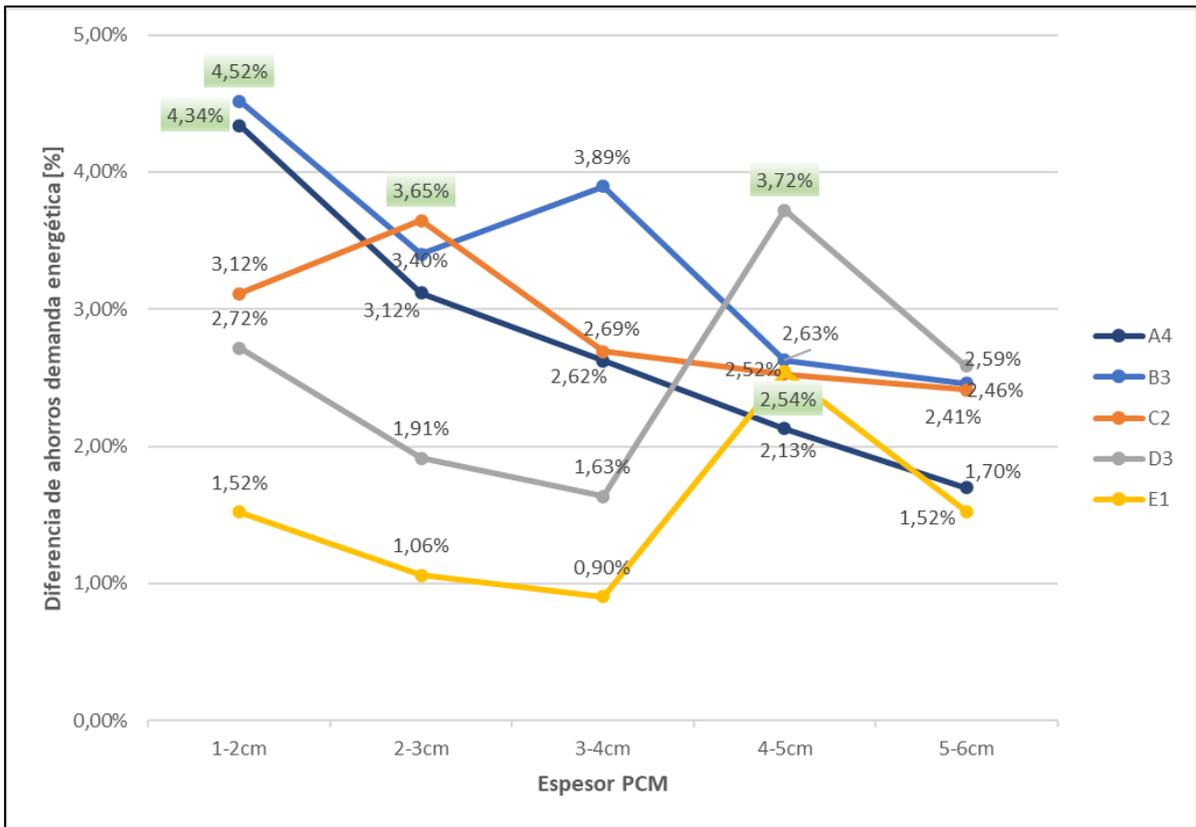


Figura 20. Porcentaje de ahorro en función del cambio en el intervalo del espesor de PCM para cada zona climática.

### 3.3 Temperatura de consigna de calefacción

La temperatura de consigna de calefacción es la temperatura considerada en el cálculo de la demanda energética que fija el límite de temperatura del aire interior a partir del cual deja de operar el sistema de acondicionamiento del edificio.

El comportamiento del PCM está fuertemente relacionado con la temperatura de consigna de calefacción ya que los ahorros obtenidos varían mucho según su punto de ajuste [22]. Si el punto de ajuste de calefacción se encuentra dentro del rango de temperatura de cambio de fase del PCM, se requerirá energía extra para llegar a la temperatura de confort ya que gran parte se está almacenando en el cambio de fase del material. Por el contrario, si el punto de ajuste se encuentra por debajo del rango de temperaturas de cambio de fase del PCM, es probable que en una situación invernal no se termine de efectuar dicho cambio de fase ya que se desaprovechan las ganancias recibidas durante un intervalo de tiempo hasta que el aire interior alcanza la temperatura de cambio de fase del PCM, momento en el que las ganancias son aprovechadas y comienzan a almacenarse en energía en forma de calor latente.

De este modo, se debe intentar que el punto de ajuste coincida con la temperatura de cambio de fase del material ya que así, cuando se alcance dicha temperatura de consigna de calefacción, las ganancias a partir de este instante se aprovechen directamente para iniciar el cambio de fase.

De este modo, teniendo en cuenta la temperatura de cambio de fase de los materiales de estudio [Tabla 5] y la temperatura operativa máxima recomendada por el RITE, se establece para los casos de estudio una temperatura de consigna de calefacción de 23°C.

### 3.4 Resumen de simulaciones

Una vez definidos todos los estándares y tipologías a considerar, así como justificadas las decisiones y medidas adoptadas para conformar los modelos finales del estudio, en la Tabla 8 se presentan los distintos casos de estudio que se van a llevar a cabo, los cuales originan un total de 135 simulaciones que se encabezan principalmente con las siguientes tres categorías:

- Caso base: integra todos los modelos diseñados de acuerdo con la normativa que aplica en cada uno de los estándares.
- Caso PCM: incluye los modelos del caso base, pero aplicándoles en sus cerramientos el espesor óptimo que le corresponda de material de cambio de fase.
- Caso EPS: incorpora los modelos del caso base, pero aplicándoles en sus cerramientos un espesor adicional al que ya posean de aislante térmico. Dicho espesor adicional coincide con el espesor que se integra de material de cambio de fase en los modelos “Caso PCM”.

			ZONA CLIMÁTICA				
			A4	B3	C2	D3	E1
CASO BASE	UNIFAMILIAR	1981-2007	1	2	3	4	5
		2008-2019	6	7	8	9	10
		2020-Act	11	12	13	14	15
	BLOQUE DE VIVIENDA 3 PLANTAS	1981-2007	16	17	18	19	20
		2008-2019	21	22	23	24	25
		2020-Act	26	27	28	29	30
	BLOQUE DE VIVIENDA > 3 PLANTAS	1981-2007	31	32	33	34	35
		2008-2019	36	37	38	39	40
		2020-Act	41	42	43	44	45
CASO PCM	UNIFAMILIAR	1981-2007	46	47	48	49	50
		2008-2019	51	52	53	54	55
		2020-Act	56	57	58	59	60
	BLOQUE DE VIVIENDA 3 PLANTAS	1981-2007	61	62	63	64	65
		2008-2019	66	67	68	69	70
		2020-Act	71	72	73	74	75
	BLOQUE DE VIVIENDA > 3 PLANTAS	1981-2007	76	77	78	79	80
		2008-2019	81	82	83	84	85
		2020-Act	86	87	88	89	90
CASO EPS	UNIFAMILIAR	1981-2007	91	92	93	94	95
		2008-2019	96	97	98	99	100
		2020-Act	101	102	103	104	105
	BLOQUE DE VIVIENDA 3 PLANTAS	1981-2007	106	107	108	109	110
		2008-2019	111	112	113	114	115
		2020-Act	116	117	118	119	120
	BLOQUE DE VIVIENDA > 3 PLANTAS	1981-2007	121	122	123	124	125
		2008-2019	126	127	128	129	130
		2020-Act	131	135	133	134	135

Tabla 8. Resumen de los casos de estudio.

A partir de todas las simulaciones descritas previamente se va a determinar la viabilidad y potencial energético que tiene la aplicación de materiales de cambio de fase en los cerramientos de diversos edificios residenciales y, además se va a evaluar si dicha solución presentaría una mejora energética frente a la solución convencional de aumentar el aislante térmico del cerramiento.

## 4. DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS

En el último apartado de la sección anterior, se han contabilizado los diferentes casos de estudio que considera el proyecto. A continuación, se describen detalladamente los modelos que van a permitir conformar todos los casos de estudio definidos en la Tabla 8.

Los modelos, así como los resultados de todos los casos de estudio, se han configurado y obtenido a partir de la herramienta DesignBuilder. A continuación, se indican algunos aspectos que comparten todos ellos:

- En todos los edificios la fachada principal está orientada al sur ya que, al realizarse un estudio de eficiencia energética lo más apropiado (pues no se tiene ningún dato de la orientación de los edificios en el estudio de segmentación) es realizarlo para el caso de orientación óptima del edificio.
- En DesignBuilder la definición de la altura de las plantas tiene una peculiaridad y es que, la altura de la planta baja se define como la altura libre de la planta, es decir, de suelo a techo. Sin embargo, en el resto de las plantas de la vivienda su altura se define de techo a techo, considerando el espesor de los forjados [20].
- Para simular la contigüidad del edificio de estudio a los edificios vecinos tal y como se muestra en la Figura 14, se ha establecido la condición de adyacencia adiabática a los cerramientos involucrados en esta contigüidad, ya que ello permite definir la proximidad del edificio de estudio a otros con condiciones térmicas similares.

### 4.1 Vivienda unifamiliar

La vivienda unifamiliar se compone de dos plantas: Planta Baja + Planta Primera. Ambas plantas son habitables, sin embargo, no se especifica la distribución de estas ya que a nivel de simulación se desprecian los tabiques interiores pues, al dividir dos zonas habitables apenas habrá diferencias en las demandas energéticas tanto si se consideran dichos tabiques como si se desprecian. Así pues, en el software DesignBuilder, cada una de las plantas es considerada como una única zona habitable [Figura 21].

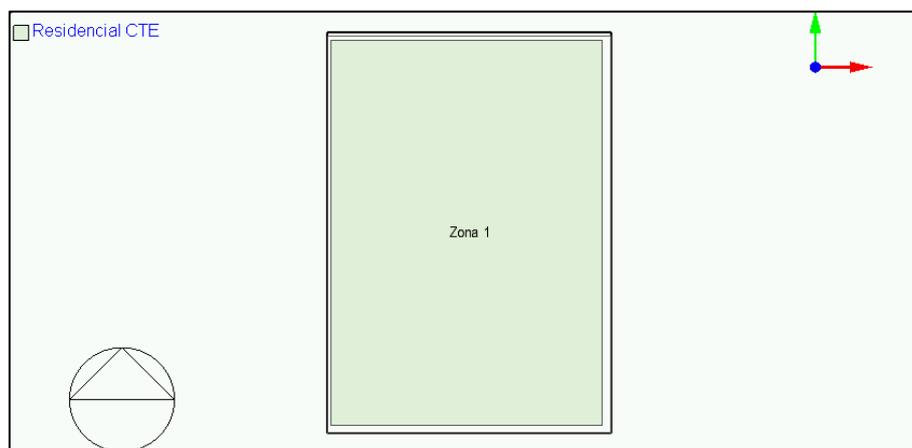


Figura 21. Plantas de la vivienda unifamiliar.

En las Tabla 9 y Tabla 10 se detallan los parámetros geométricos que permiten modelar en DesignBuilder las viviendas unifamiliares de cada uno de los periodos de construcción considerados. Como ya se ha especificado en el apartado 3.2 de este documento, dichos parámetros se toman del estudio “Segmentación del parque residencial de viviendas en España en clústeres tipológicos” [13].

<b>Periodo de construcción 1981-2007</b>	<b>Relación Frente/Fondo</b>	0,7
	<b>Frente (m)</b>	6,73
	<b>Fondo (m)</b>	9,61
	<b>Altura libre entre plantas (m)</b>	2,6
	<b>Altura techo a techo (m)*</b>	2,91
	<b>Venvolvente (m<sup>3</sup>) *</b>	336,46
	<b>Aenvolvente (m<sup>2</sup>) *</b>	245,87
	<b>Compacidad (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>) *</b>	1,37
<b>Periodo de construcción 2008-2019</b>	<b>Relación Frente/Fondo</b>	0,7
	<b>Frente (m)</b>	6,94
	<b>Fondo (m)</b>	9,91
	<b>Altura libre entre plantas (m)</b>	2,6
	<b>Altura techo a techo (m)*</b>	2,915
	<b>Venvolvente (m<sup>3</sup>) *</b>	357,79
	<b>Aenvolvente (m<sup>2</sup>) *</b>	257,15
	<b>Compacidad (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>) *</b>	1,39

Tabla 9. Parámetros geométricos vivienda unifamiliar 1981-2007 y 2008-2019.

Tal y como se ha indicado también en el apartado 3.2 de este documento, el estudio de segmentación [13] no incluye los edificios construidos posteriormente al año 2011 ya que dicho estudio todavía no se ha actualizado con el censo de 2021.

De este modo, en términos de parámetros geométricos, el periodo de construcción 2020-Act presenta prácticamente el mismo patrón que el modelo de vivienda unifamiliar 2008-2019. La única diferencia geométrica existente entre ambos modelos se da en la altura de techo a techo de las plantas debido a las exigencias de aislante definidas en el CTE DB-HE 2019. En la Tabla 10 se detallan dichos valores.

<b>Altura techo a techo (m)*</b>	Zona climática A: 2,91
	Zona climática B: 2,915
	Zona climática C: 2,915
	Zona climática D: 2,92
	Zona climática E: 2,925

Tabla 10. Alturas de techo a techo entre las plantas de vivienda unifamiliar 2020-Act.

La superficie total de huecos exteriores por vivienda se calcula proporcionalmente a la hipótesis que aplica el estudio de segmentación para todos los clústeres [Apartado 3.2]. De este modo, y considerando la misma apariencia y número de huecos que se establece en dicho estudio de segmentación [Apartado 3.2], se obtienen las siguientes dimensiones y superficies mostradas en la Tabla 11:

Periodo de construcción	Superficie útil vivienda (m <sup>2</sup> )	4x Superficie ventana Tipo 1 (m <sup>2</sup> )	1x Superficie ventana Tipo 2 (m <sup>2</sup> )	1x Superficie puerta (m <sup>2</sup> )	1x Superficie ventanal (m <sup>2</sup> )	Total (m <sup>2</sup> )
1981-2007	129,41	1,5 x 1,5	1,4 x 1,2	1,9 x 1	2 x 2,4	17,38
		9	1,68	1,90	4,80	
2008-2019 2020-Act	137,61	1,55 x 1,55	1,4 x 1,4	1,9 x 1	2,1 x 2,4	18,51
		9,61	1,96	1,90	5,04	

Tabla 11. Dimensiones y superficie de los huecos en la vivienda unifamiliar para cada periodo de construcción.

El aspecto general del edificio vivienda unifamiliar modelado con la herramienta DesignBuilder se muestra en la Figura 22, similar al mostrado en el estudio de segmentación [Figura 14].

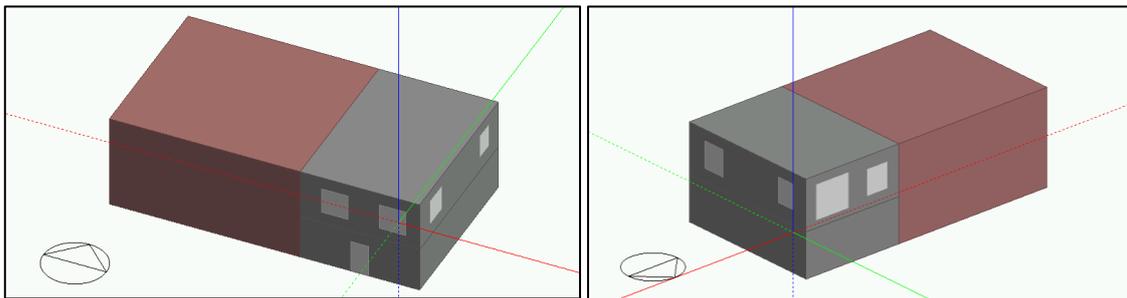


Figura 22. Modelo 3D vivienda unifamiliar mediante el software DesignBuilder.

#### 4.2 Bloque de viviendas de 3 Plantas

Este bloque de viviendas se compone de cuatro plantas: Planta Baja y 3 plantas idénticas que integran dos viviendas cada una. La planta baja consta únicamente de las escaleras y el ascensor para acceder a las plantas superiores y se encuentra junto a un local no habitable [Apartado 3.2]. Debido a que ambos espacios son no habitables y, por tanto, tienen una demanda energética nula, dicha planta se considera como un único espacio no habitable [Figura 23]. El resto de las plantas se componen de dos viviendas cada una (zonas habitables) y de la zona de escaleras y hueco del ascensor (zona no habitable). En las viviendas que componen el bloque no se detalla la distribución ya que, a nivel de simulación, se desprecian los tabiques interiores siguiendo el mismo criterio que se ha establecido para las viviendas unifamiliares [Figura 24].

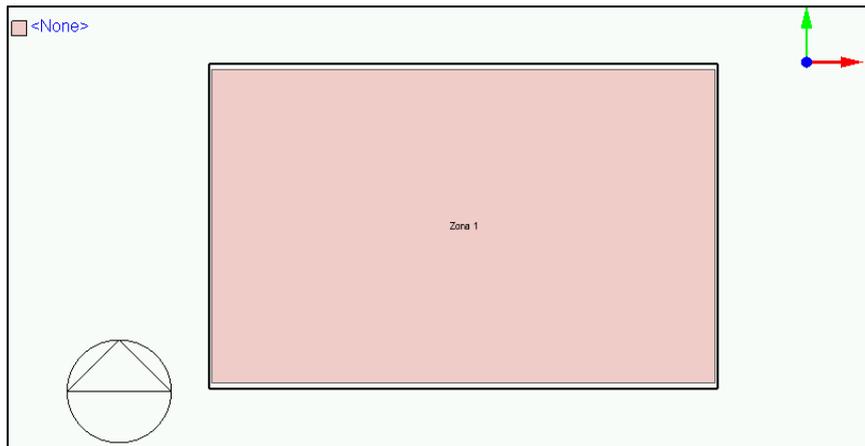


Figura 23. Planta Baja del bloque de viviendas 3 plantas.

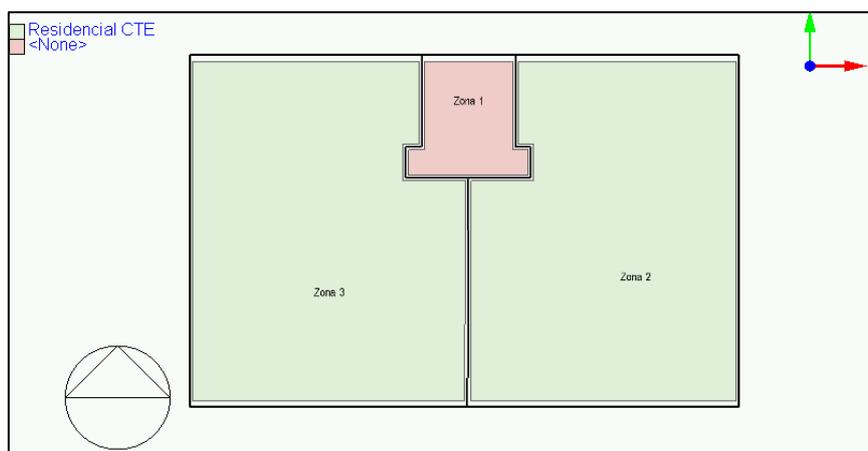


Figura 24. Plantas que integran viviendas del bloque de viviendas 3 plantas.

En las Tabla 12 y Tabla 13 se detallan los parámetros geométricos que permiten modelar en DesignBuilder los bloques de viviendas de 3 plantas de cada uno de los periodos de construcción considerados. Como ya se ha especificado en varios puntos del documento, dichos parámetros se toman del estudio segmentación [13].

<b>Periodo de construcción 1981-2007</b>	<b>Relación Frente/Fondo (Edificio)</b>	1,55	
	<b>Frente (Edificio) (m)</b>	17,59	
	<b>Fondo (Edificio) (m)</b>	11,37	
	<b>Altura libre entre plantas (m)</b>	2,6	
	<b>Altura techo a techo Planta 1 (m)*</b>	Zona climática A:	2,915
		Zona climática B:	2,915
		Zona climática C:	2,92
		Zona climática D:	2,925
		Zona climática E:	2,925
	<b>Altura techo a techo Planta 2 y 3 (m)*</b>	2,91	
<b>Venvolvente (m<sup>3</sup>) *</b>	1455,62		
<b>Aenvolvente (m<sup>2</sup>) *</b>	783,115		
<b>Compacidad (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>) *</b>	1,86		

<b>Periodo de construcción 2008-2019</b>	<b>Relación Frente/Fondo (Edificio)</b>	1,55	
	<b>Frente (Edificio) (m)</b>	17,78	
	<b>Fondo (Edificio) (m)</b>	11,47	
	<b>Altura libre entre plantas (m)</b>	2,6	
	<b>Altura techo a techo Planta 1 (m)*</b>	Zona climática A:	2,925
		Zona climática B:	2,93
		Zona climática C:	2,935
		Zona climática D:	2,935
		Zona climática E:	2,945
	<b>Altura techo a techo Planta 2 y 3 (m)*</b>	2,915	
<b>Venvolvente (m<sup>3</sup>) *</b>	1489,44		
<b>Aenvolvente (m<sup>2</sup>) *</b>	802,38		
<b>Compacidad (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>) *</b>	1,86		

Tabla 12. Parámetros geométricos bloque de viviendas 3 plantas 1981-2007 y 2008-2019.

Tal y como se ha explicado en el apartado anterior, en términos de parámetros geométricos, el modelo correspondiente al periodo de construcción 2020-Act presenta prácticamente el mismo patrón que el modelo 2008-2019. La única diferencia, debida a la exigencia de aislamiento que marca el CTE DB-HE 2019, se indica en la Tabla 13.

<b>Altura techo a techo Planta 1 (m)*</b>	Zona climática A:	2,94
	Zona climática B:	2,945
	Zona climática C:	2,945
	Zona climática D:	2,95
	Zona climática E:	2,955
<b>Altura techo a techo Planta 2 y 3 (m)*</b>	Zona climática A:	2,91
	Zona climática B:	2,915
	Zona climática C:	2,915
	Zona climática D:	2,92
	Zona climática E:	2,925

Tabla 13. Alturas de techo a techo entre las plantas del bloque de viviendas de 3 plantas 2020-Act.

La superficie total de huecos exteriores por vivienda se muestra en la Tabla 14. Dichos valores se han obtenido con el mismo procedimiento especificado para el caso de vivienda unifamiliar.

<b>Periodo de construcción</b>	<b>Superficie útil vivienda (m<sup>2</sup>)</b>	<b>4x Superficie ventana Tipo 1 (m<sup>2</sup>)</b>	<b>1x Superficie ventana Tipo 2 (m<sup>2</sup>)</b>	<b>1x Superficie puerta (m<sup>2</sup>)</b>	<b>1x Superficie ventanal (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Total (m<sup>2</sup>)</b>
<b>1981-2007</b>	94,72	1,2 x 1,2	1,1 x 1,3	1,9 x 1	1,8 x 2	12,69
		5,76	1,43	1,90	3,60	
<b>2008-2019 2020-Act</b>	95,45	1,3 x 1,3	1,1 x 1	1,9 x 1	1,5 x 2	12,76
		6,76	1,1	1,90	3,00	

Tabla 14. Dimensiones y superficie de los huecos en el bloque de viviendas de 3 plantas para cada periodo de construcción.

El aspecto general del edificio bloque de viviendas de 3 plantas modelado con la herramienta DesignBuilder se muestra en la Figura 25, pudiendo comprobar su similitud con el mostrado en el estudio de segmentación [Figura 14].

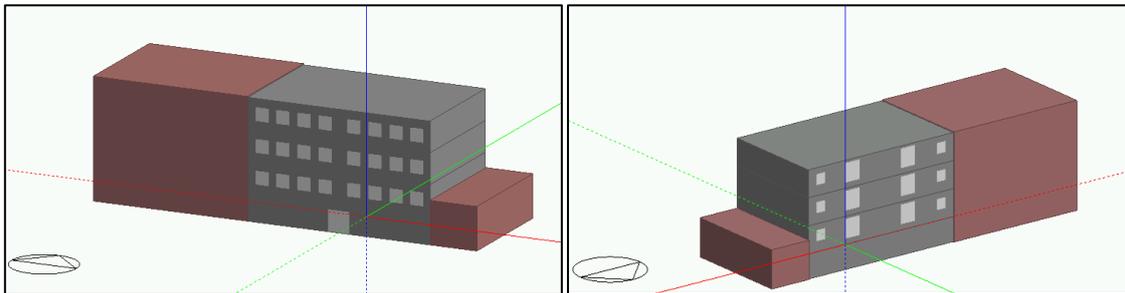


Figura 25. Modelo 3D bloque de viviendas 3 plantas mediante el software DesignBuilder.

### 4.3 Bloque de viviendas de más de 3 Plantas

El bloque de viviendas se compone de siete plantas: Planta Baja y 6 plantas idénticas que integran dos viviendas cada una. La planta baja consta únicamente de las escaleras y el ascensor para acceder a las plantas superiores y se encuentra junto a un local no habitable [Apartado 3.2]. Debido a que ambos espacios son no habitables y, por tanto, tienen una demanda energética nula, dicha planta se considera como un único espacio no habitable [Figura 26]. El resto de las plantas se componen de dos viviendas cada una (zonas habitables) y de la zona de escaleras y hueco del ascensor (zona no habitable). En las viviendas que componen el bloque no se detalla la distribución ya que, a nivel de simulación, siguiendo el mismo razonamiento que para el resto de los casos se desprecian los tabiques interiores [Figura 27].

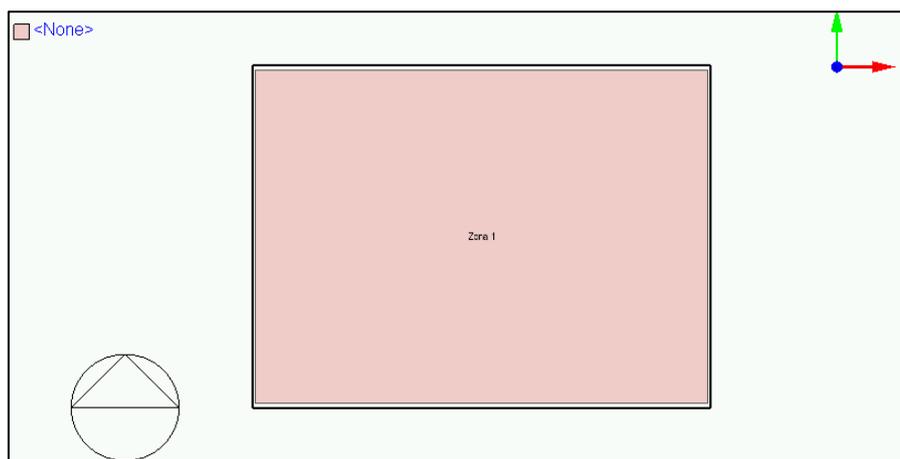


Figura 26. Planta Baja del bloque de viviendas de más de 3 Plantas.

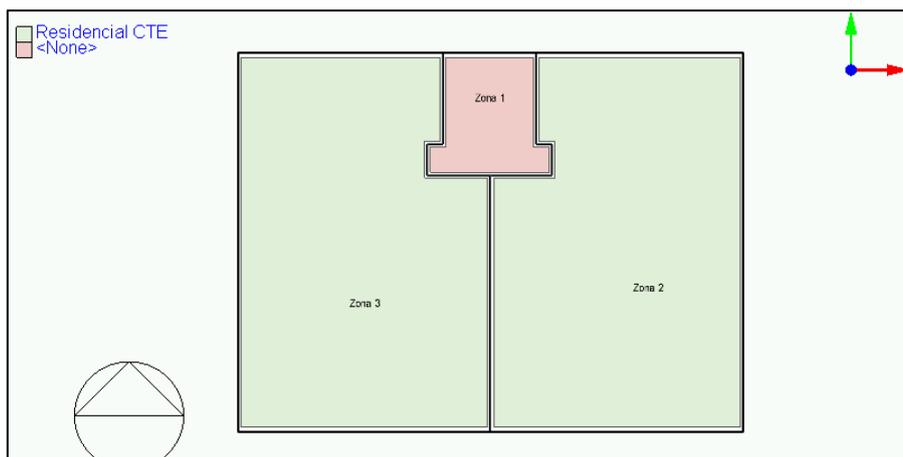


Figura 27. Plantas que integran viviendas del bloque de viviendas de más de 3 plantas.

En las Tabla 15 y Tabla 16 se detallan los parámetros geométricos obtenidos del estudio de segmentación [13] que permiten modelar en DesignBuilder los bloques de viviendas de más de 3 plantas de cada uno de los periodos de construcción considerados.

<b>Periodo de construcción 1981-2007</b>	<b>Relación Frente/Fondo (Edificio)</b>	1,32
	<b>Frente (Edificio) (m)</b>	16,22
	<b>Fondo (Edificio) (m)</b>	12,29
	<b>Altura libre entre plantas (m)</b>	2,6
	<b>Altura techo a techo Planta 1 (m)*</b>	Zona climática A: 2,915
		Zona climática B: 2,915
		Zona climática C: 2,92
		Zona climática D: 2,925
		Zona climática E: 2,925
	<b>Altura techo a techo Planta 2-6</b>	2,91
<b>Venvolvente (m<sup>3</sup>) *</b>	2906,43	
<b>Aenvolvente (m<sup>2</sup>) *</b>	890,28	
<b>Compacidad (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>) *</b>	3,26	
<b>Periodo de construcción 2008-2019</b>	<b>Relación Frente/Fondo (Edificio)</b>	1,32
	<b>Frente (Edificio) (m)</b>	16,22
	<b>Fondo (Edificio) (m)</b>	12,29
	<b>Altura libre entre plantas (m)</b>	2,6
	<b>Altura techo a techo Planta 1 (m)*</b>	Zona climática A: 2,925
		Zona climática B: 2,93
		Zona climática C: 2,935
		Zona climática D: 2,935
		Zona climática E: 2,945
	<b>Altura techo a techo Planta 2-6</b>	2,915
<b>Venvolvente (m<sup>3</sup>) *</b>	2968,07	
<b>Aenvolvente (m<sup>2</sup>) *</b>	949,82	
<b>Compacidad (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>) *</b>	3,12	

Tabla 15. Parámetros geométricos bloque de viviendas de más de 3 Plantas 1981-2007 y 2008-2019.

Como ya se ha indicado en el resto de los casos, la única diferencia geométrica entre los periodos de construcción 2008-2019 y 2020-Act se da en las alturas de techo a techo de las distintas plantas. Dichos valores se muestran en la Tabla 16.

<b>Altura techo a techo Planta 1 (m)*</b>	Zona climática A: 2,94
	Zona climática B: 2,945
	Zona climática C: 2,945
	Zona climática D: 2,95
	Zona climática E: 2,955
<b>Altura techo a techo Planta 2-6 (m)*</b>	Zona climática A: 2,91
	Zona climática B: 2,915
	Zona climática C: 2,915
	Zona climática D: 2,92
	Zona climática E: 2,925

Tabla 16. Alturas de techo a techo entre las plantas del bloque de viviendas de más de 3 plantas 2020-Act.

La superficie total de huecos exteriores por vivienda se muestra en la Tabla 17. Para obtener dichos valores se ha procedido del mismo modo que en el resto de las tipologías.

Periodo de construcción	Superficie útil vivienda (m <sup>2</sup> )	4x Superficie ventana Tipo 1 (m <sup>2</sup> )	1x Superficie ventana Tipo 2 (m <sup>2</sup> )	1x Superficie puerta (m <sup>2</sup> )	1x Superficie ventanal (m <sup>2</sup> )	Total (m <sup>2</sup> )
<b>1981-2007</b>	93,09	1,2 x 1,2	1,2 x 1	1,9 x 1	1,8 x 2	12,46
		5,76	1,2	1,90	3,60	
<b>2008-2019 2020-Act</b>	94,40	1,3 x 1,3	1 x 1	1,9 x 1	1,5 x 2	12,66
		6,76	1,0	1,90	3,00	

Tabla 17. Dimensiones y superficie de los huecos en el bloque de viviendas de más de 3 plantas para cada periodo de construcción.

El aspecto general del edificio bloque de viviendas de más de 3 plantas modelado con la herramienta DesignBuilder se muestra en la Figura 28 y, puede comprobarse su similitud con el presentado en el estudio de segmentación [Figura 14].

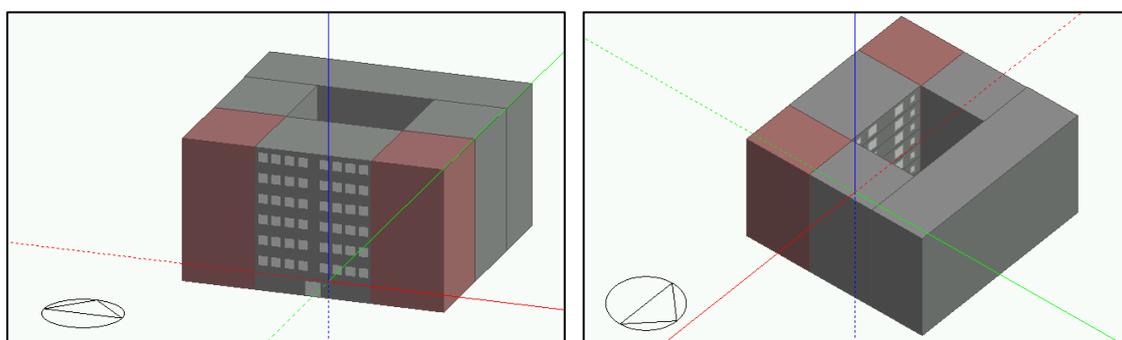


Figura 28. Modelo 3D bloque de viviendas de más de 3 plantas mediante el software DesignBuilder.

\*Estos parámetros no se ha obtenido directamente del estudio de segmentación. El volumen en la envolvente, el área de la envolvente y la compacidad se han calculado a partir de los datos proporcionados por dicho estudio, sin embargo, para calcular la altura de techo a techo previamente se han definido las soluciones constructivas específicas según normativa de forjado interior y forjado interior entre zonas de distinto uso para cada periodo de construcción [Anexo 1], y se ha sumado a sus espesores la altura libre entre plantas.

En el presente apartado se han indicado los parámetros geométricos a partir de los cuales se conforman los distintos modelos en el software DesignBuilder. Sin embargo, para terminar de definir estos modelos es necesario determinar el resto de las características constructivas y parámetros de entrada al software. Todo ello se detalla en el Anexo 1 del documento *Anexos*.

## 5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Una vez simulados los 135 casos de estudio, se obtienen los valores de las siguientes variables para cada uno de ellos:

- Demanda de calefacción y refrigeración (kWh/año)
- Consumo de energía final para calefacción y refrigeración (kWh/año)
- Nº horas de discomfort térmico (h/año)

Las horas de discomfort se determinan mediante los periodos en los que la relación de humedad y la temperatura operativa quedan fuera de las regiones establecidas por el Estándar ASHARE 55 [20]. Los valores del conjunto de resultados están reflejados detalladamente en el Anexo 2 del documento *Anexos*.

Con el fin de facilitar la comprensión e interpretación de los resultados y conclusiones obtenidos, se realiza inicialmente un análisis de las demandas base en los distintos periodos de construcción según la tipología de los edificios.

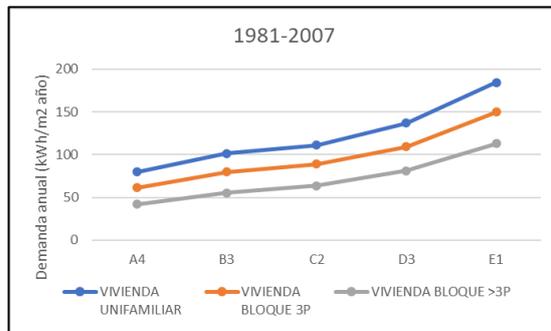


Figura 29. Demanda energética según tipología para el periodo de construcción 1981-2007.

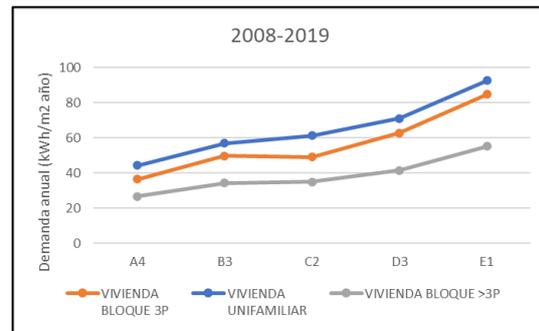


Figura 30. Demanda energética según tipología para el periodo de construcción 2008-2019.

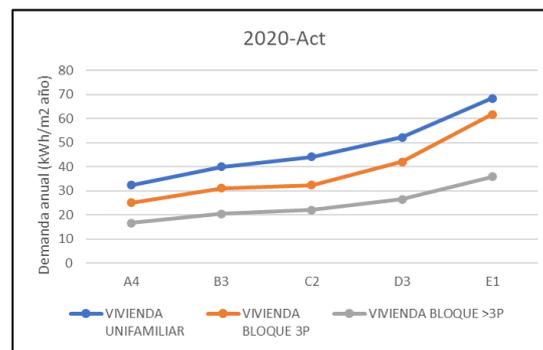


Figura 31. Demanda energética según tipología para el periodo de construcción 2020-Act.

Tal y como muestran los resultados del caso base, en los tres periodos de construcción considerados se da el mismo patrón: la tipología vivienda unifamiliar demanda una mayor energía por superficie, seguida de la tipología de bloque de viviendas de 3 plantas y, siendo así el bloque de viviendas de más de 3 plantas el que menor cantidad de energía por superficie requiere. Estos resultados son acordes a las características que presentan cada una de las tipologías pues, la vivienda unifamiliar es el edificio con menor compacidad y mayor exposición al entorno exterior, por lo que se encuentra poco protegido a las condiciones del ambiente y

sufrirá mayores pérdidas al exterior. Por el contrario, el bloque de viviendas de más de 3 plantas es el edificio de mayor compacidad y menor exposición al medio exterior, por lo que se encuentra mucho más protegido de las condiciones ambientales que el resto de las tipologías y, además presentará menores pérdidas al exterior. Por último, el bloque de viviendas de 3 plantas es un edificio intermedio entre los descritos previamente ya que, su compacidad, así como su exposición al entorno median entre las de las otras dos tipologías.

En el Anexo 2 del documento *Anexos*, puede comprobarse que dichas desigualdades entre las demandas energéticas totales de las tres tipologías se deben fundamentalmente a la demanda de calefacción pues, las diferencias que presentan entre sus compacidades y exposición al ambiente influyen principalmente en esta variable.

A continuación, se representa mediante gráficos los resultados obtenidos con el fin de analizar los siguientes aspectos:

- CASO ANÁLISIS 1: El ahorro energético anual por zona climática que proporciona la integración del PCM en las distintas tipologías según su periodo de construcción.
- CASO ANÁLISIS 2: El ahorro energético anual por zona climática que proporciona la integración del PCM en los distintos periodos de construcción según la tipología de los edificios.
- CASO ANÁLISIS 3: Comparativa por zona climática del ahorro energético y mejora de confort que proporciona la aplicación de PCM frente a la de aislamiento térmico para cada periodo de construcción en las distintas tipologías.

En los casos de análisis descritos no se comparan los resultados obtenidos entre las distintas zonas climáticas ya que las condiciones de la solución de PCM implementadas en cada climatología no son equivalentes y, por tanto, la comparativa de ahorro entre estas no resulta razonable.

### 5.1 Caso de análisis 1

El presente análisis, tal y como se ha especificado, muestra gráficamente el ahorro energético anual por zona climática que proporciona la solución de integrar PCM en las distintas tipologías según su periodo de construcción.

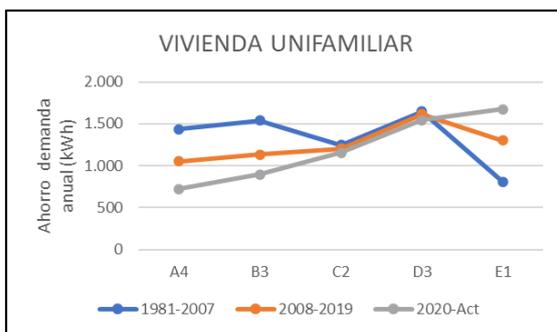


Figura 32. Ahorro energético anual en viviendas unifamiliar según periodo de construcción

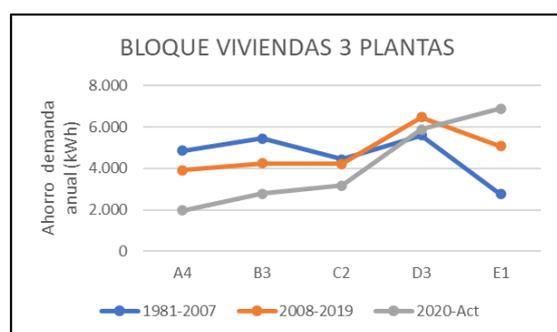
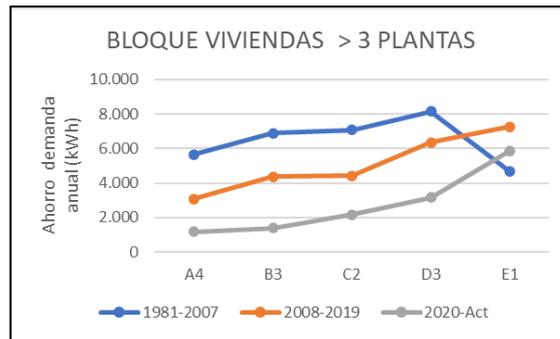


Figura 33. Ahorro energético anual en bloques de vivienda de 3 plantas según periodo de construcción.



**Figura 34. Ahorro energético anual en bloques de vivienda de más de 3 plantas según periodo de construcción.**

Un aspecto de gran relevancia para comprender los resultados que se obtienen con la implementación del PCM es que, dicha integración de material en los cerramientos genera principalmente ahorros en la demanda de calefacción [Anexo 2]. Esto indica que dichos ahorros generados van a estar condicionados al comportamiento que tengan las tipologías en invierno, así como a la severidad de clima invernal a la que estén expuestas.

Los ahorros energéticos proporcionados en la tipología vivienda unifamiliar y bloque de viviendas de 3 plantas en función del clima y periodo de construcción siguen un patrón muy similar. Los mayores ahorros para climas de inviernos muy suaves y suaves en estas tipologías de edificios se consiguen en el periodo de construcción en el que el requerimiento de aislamiento térmico es menos exigente (1981-2007). Esto se debe a que el PCM interactúa mejor tanto con el exterior como con el interior debido a que el aislamiento no opone gran resistencia térmica y, como se puede comprobar, para dicha tipología de climas este fenómeno es beneficioso. Por ello, en este tipo de climas, para los edificios con mayor exigencia de aislante térmico (los construidos durante el periodo 2020-Act) los ahorros que proporciona la integración de PCM en los cerramientos son los más bajos. Sin embargo, los mayores ahorros para edificios ubicados en climas de inviernos muy severos se consiguen en el periodo de construcción en el que el requerimiento de aislamiento térmico es más exigente (2020-Act) ya que el PCM está más protegido de las bajas temperaturas externas y puede alcanzar con mayor facilidad su temperatura de cambio de fase y ser útil.

A partir de los gráficos anteriores, se puede verificar también que la tipología bloque de viviendas de más de 3 plantas tiene un patrón de comportamiento muy distinto a las otras dos tipologías. La razón de esta desigualdad se debe principalmente a dos motivos: la interacción y exposición que el PCM tiene con el exterior (circunstancia condicionada por el aislante y el entorno) y la orientación principal del PCM.

Como se ha comentado en el análisis de los resultados del caso base, la tipología bloque de viviendas de más de 3 plantas describe a edificios de mayor compacidad y menor exposición con el entorno exterior, lo que le constituye en un edificio más protegido de las condiciones extremas del ambiente y con menores pérdidas al exterior. Esto provoca que, el comportamiento que se da en las otras tipologías para climas de inviernos muy suaves y suaves se prologue en el resto de las zonas climáticas pues, dicha protección que presenta el edificio

frente al ambiente le hace comportarse como si se ubicase en un clima menos severo al que realmente se encuentra expuesto.

Además, en esta tipología, los muros más partícipes de la envolvente con el exterior (de forma pura e íntegra, ya que la captación de radiación por los muros norte está afectada por los bloques que le rodean [Figura 28]) son los orientados al sur por lo que, al tratarse de la orientación óptima [Figura 35], cuanto menor exigencia de aislante se tenga, mayor será la interacción del PCM con el exterior y, por tanto, ello proporcionará mayores ahorros en la mayoría de las zonas climáticas. La clave de esta situación es que si es aislamiento no opone resistencia, en invierno el PCM recibirá elevadas radiaciones que almacenará y llegará a ceder al interior de la vivienda proporcionando elevados ahorros en la demanda de calefacción.

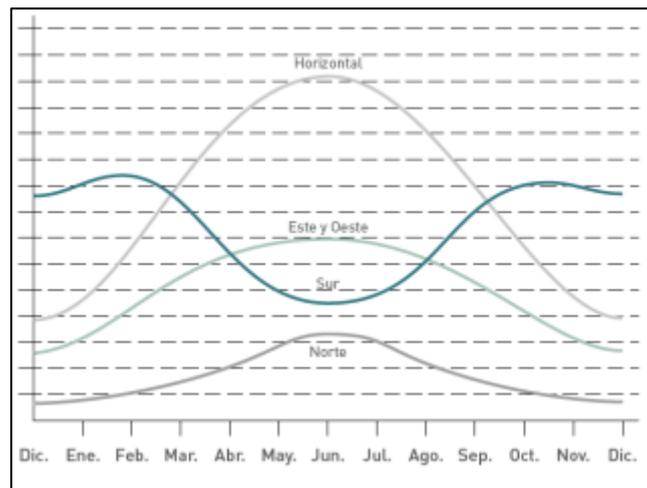


Figura 35. Comparación de la radiación incidente a lo largo de un año recibida en los muros exteriores de cada orientación y en la cubierta plana [23].

Para el caso concreto de inviernos muy severos, a diferencia del resto de tipologías, en el bloque de viviendas de más de 3 plantas el mayor ahorro no se obtiene para el periodo de construcción de mayor exigencia de aislante térmico y, esto se debe a los dos motivos descritos previamente que justifican el comportamiento de esta tipología.

Como conclusiones generales de los anteriores razonamientos puede indicarse que el aislamiento térmico tiene una gran repercusión sobre el comportamiento del PCM asegurando que, en edificios expuestos a una climatología de inviernos suaves y muy suaves dicha solución producirá mayores ahorros energéticos si estos presentan bajos espesores de aislante y, por el contrario, en edificios ubicados en una climatología de inviernos muy severos dicha solución tendrá un mejor rendimiento si los espesores de aislante son notables. Según los resultados, también puede concluirse que la interacción y exposición del edificio con el exterior, así como la orientación en la que esté integrada la solución, influyen en el comportamiento del PCM y en los ahorros que se pueden llegar a obtener.

## 5.2 Caso de análisis 2

El presente análisis, como ya se ha detallado previamente, muestra el ahorro energético anual por zona climática que proporciona la integración del PCM en los distintos periodos de construcción según la tipología del edificio.

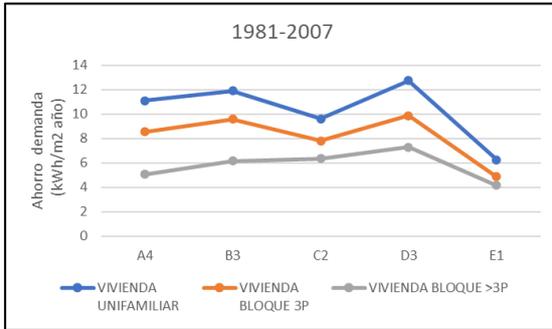


Figura 37. Ahorro energético anual en el periodo de construcción 1981-2007 según tipología.

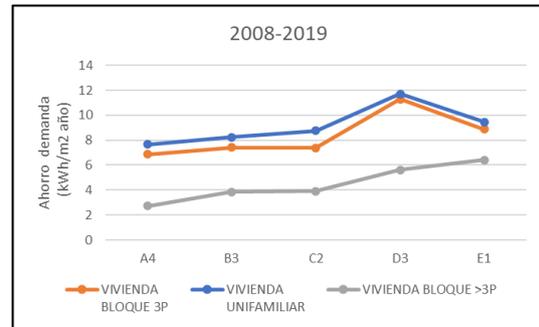


Figura 36. Ahorro energético anual en el periodo de construcción 2008-2019 según tipología.

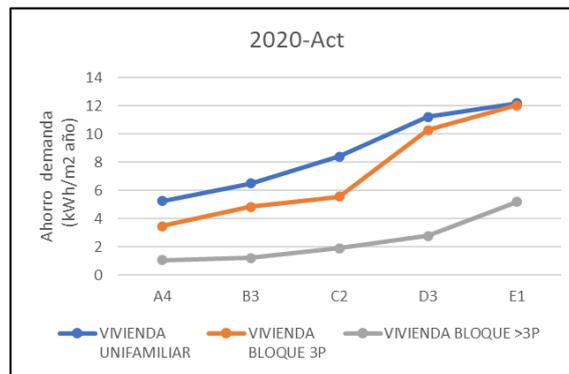


Figura 38. Ahorro energético anual en el periodo de construcción 2020-Act según tipología

Como se puede observar, para los tres periodos de construcción considerados, la tipología vivienda unifamiliar proporciona mayores ahorros energéticos anuales por superficie en todas las zonas climáticas. Esto se debe a la menor compactidad que caracteriza a esta tipología pues, para un mismo volumen la cantidad de PCM integrada será mayor, ya que habrá mayor superficie de envolvente y, por tanto, mayor superficie de muro exterior en el que integrar la solución.

De este modo, se puede concluir que, la aplicación de PCM en edificios de menores compactidades proporcionará mayores ahorros energéticos por superficie en cualquiera que sea la ubicación del edificio.

A partir de estos gráficos también puede comprobarse que, las viviendas unifamiliares y los bloques de vivienda de 3 plantas proporcionan ahorros energéticos más similares para los tres periodos de construcción. Sin embargo, el bloque de viviendas de más de 3 plantas presenta una configuración que lo hace comportarse de manera distinta a las otras tipologías en los casos en los que el aislamiento térmico es más notable. Los dos motivos de esta diferencia se han explicado en el apartado 5.1.

### 5.3 Caso de análisis 3

El presente análisis muestra la comparativa por zona climática del ahorro energético y de la mejora de confort que proporciona la solución de PCM frente a la de aislamiento térmico para cada periodo de construcción de las distintas tipologías.

El aislamiento térmico definido en las simulaciones son planchas de poliestireno expandido (EPS) con una conductividad térmica de 0,037 W/mK ya que se trata de una solución típica y muy común en la mayoría de las viviendas. Además, los resultados apenas diferirían para cualquier otro material que se considerase con similar conductividad térmica.

#### 5.3.1 Vivienda unifamiliar

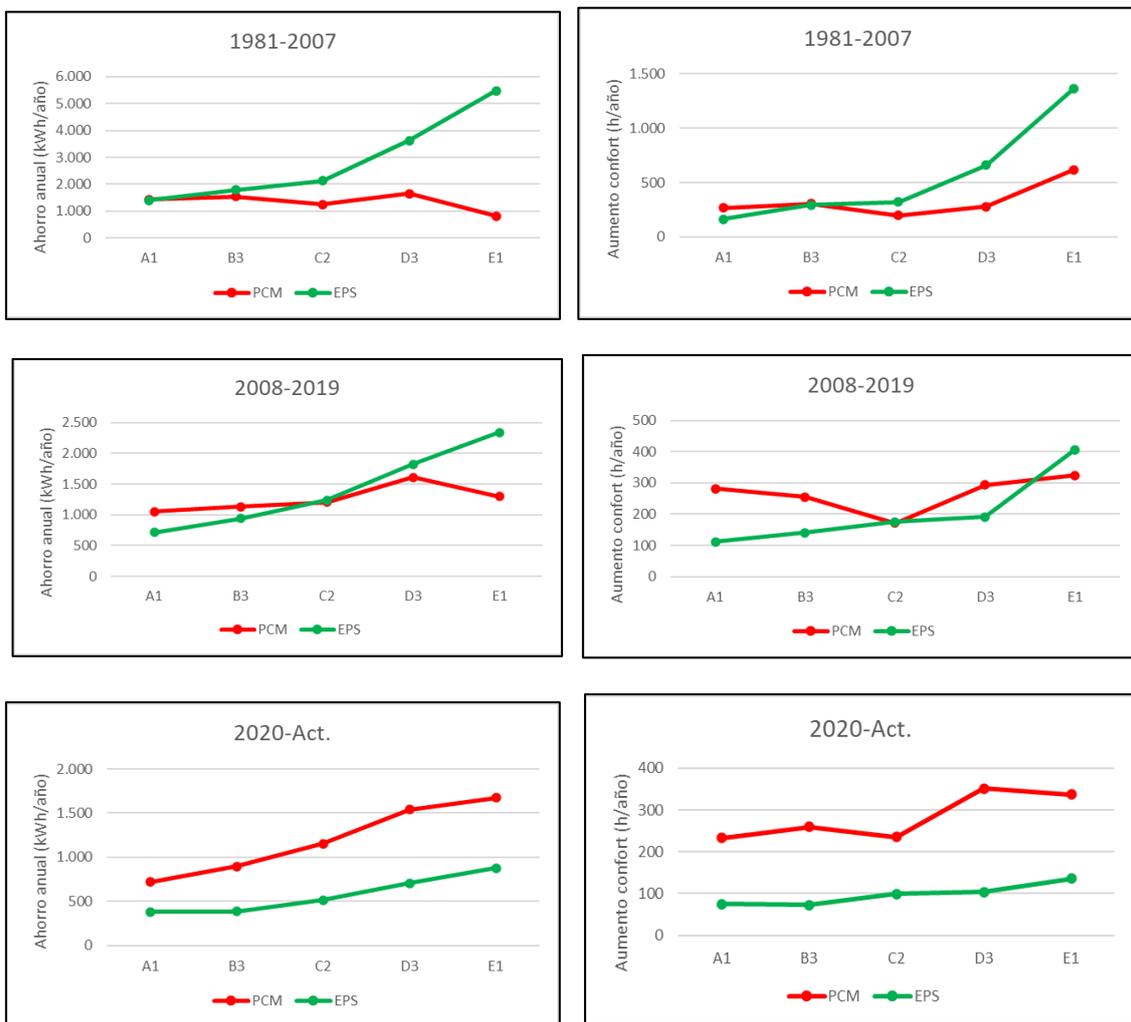


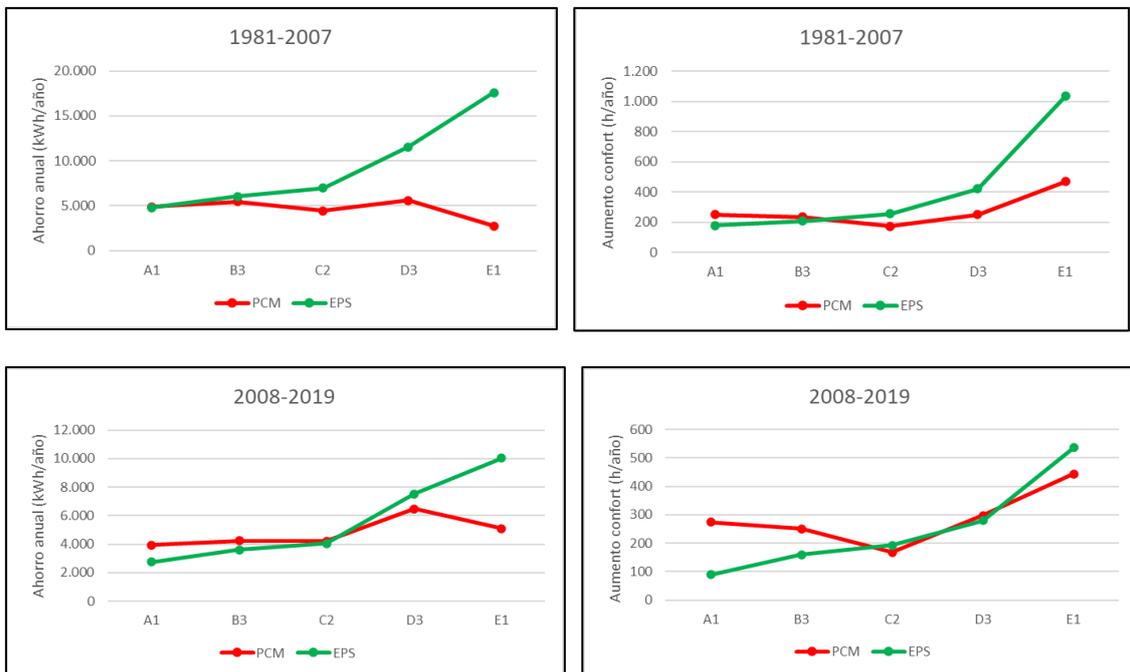
Figura 39. Ahorro energético y mejora de confort que proporcionan las distintas soluciones en la vivienda unifamiliar para cada periodo de construcción.

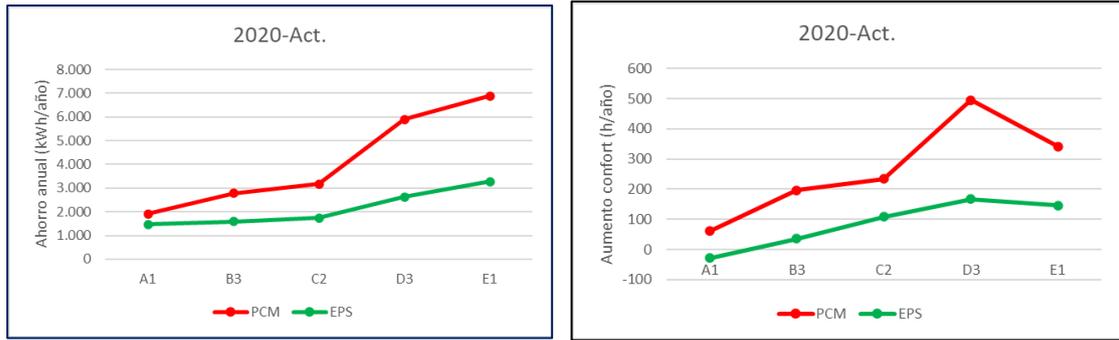
A partir de los resultados se puede comprobar que, en aquellos periodos de construcción en los que la exigencia de aislamiento es baja, la inclusión de éste tiene un gran efecto en el ahorro que se proporciona en la demanda energética, sobre todo en las zonas climáticas de inviernos severos y muy severos. Para este periodo de construcción (1981-2007), a nivel general, el efecto

de ahorro que proporciona el aislante térmico no se puede comparar al que proporciona el PCM, ya que este último es bastante inferior. Sin embargo, en los edificios más recientes donde el espesor de aislante es más notable debido a su periodo de construcción (2020-Act), el ahorro que proporciona el PCM es superior al que se da añadiendo más aislante del ya exigido por la normativa. Este comportamiento se debe a que el exceso de aislante puede llegar a provocar la saturación del cerramiento haciendo que su implementación no sea eficiente. Para el caso intermedio en el que la exigencia de aislante es más moderada (con respecto a los otros dos casos), el PCM solo proporciona mayores ahorros que la implementación del aislante en aquellas zonas climáticas de inviernos muy suaves y suaves en las cuales la integración del aislante no tiene tanta repercusión debido a que la climatología invernal no es tan extrema.

En cuanto a la mejora de confort, se puede confirmar que la implementación de PCM no siempre va a proporcionar un mayor confort que la integración de aislante térmico. Esto se va a producir generalmente en aquellas situaciones en las que el PCM proporcione mayores ahorros o en aquellas en las que la diferencia de ahorro entre ambas alternativas sea poco apreciable. Sin embargo, un mayor confort proporcionado por el PCM no siempre indica directamente un mayor ahorro. Ello se debe a que el periodo temporal en el que el PCM está proporcionando esa mejora de confort no siempre coincide con el periodo de uso de la calefacción y refrigeración.

### 5.3.2 Bloque de viviendas de 3 plantas

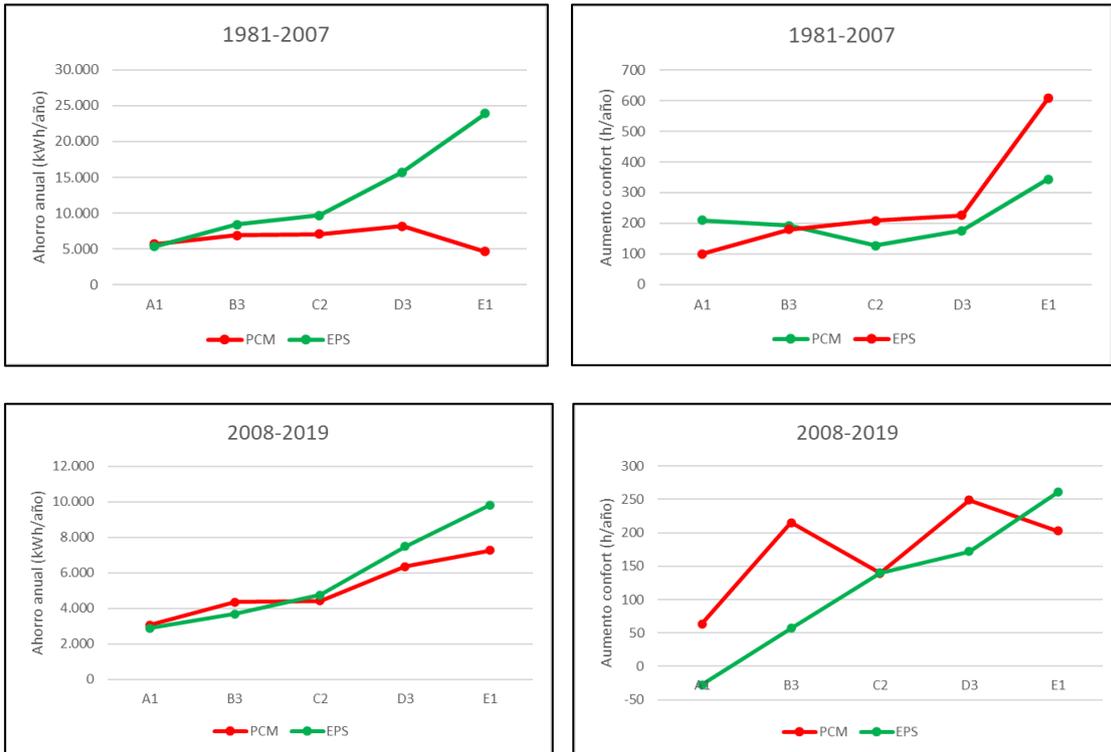


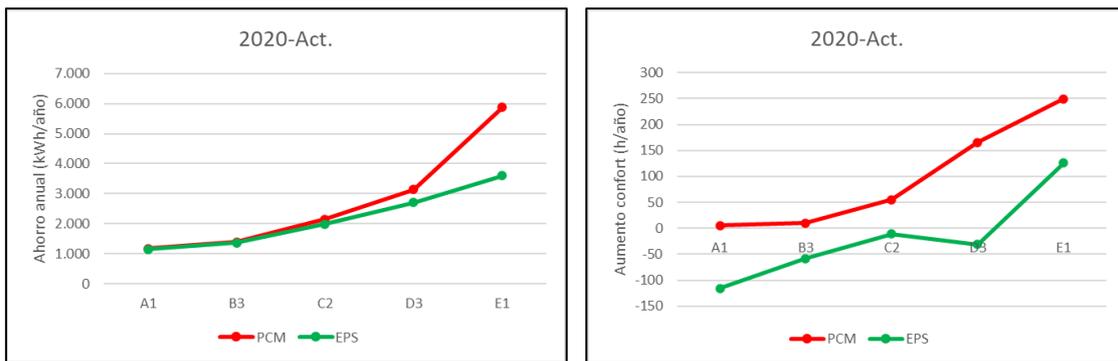


**Figura 40. Ahorro energético y mejora de confort que proporcionan las distintas soluciones en el bloque de viviendas de 3 plantas para cada periodo de construcción.**

Como ya se ha podido comprobar en los otros dos análisis, el comportamiento de la tipología vivienda unifamiliar y bloque de viviendas de 3 plantas siguen un patrón muy similar. Para este tercer caso de análisis también se da esta semejanza por lo que las conclusiones y justificaciones adoptadas en el apartado anterior son también aplicables y válidas para esta tipología de edificio [Apartado 5.3.1].

### 5.3.3 Bloque de viviendas de más de 3 plantas





**Figura 41. Ahorro energético y mejora de confort que proporcionan las distintas soluciones en el bloque de viviendas de más de 3 plantas para cada periodo de construcción.**

A partir de los resultados y, como ya se ha comprobado en el resto de los análisis, el bloque de viviendas de más de 3 plantas presenta una configuración que lo hace comportarse de manera distinta a las otras tipologías en los casos en los que el aislamiento térmico es más notable.

En el periodo de construcción 1981-2007, al igual que ocurría en las otras dos tipologías, la inclusión de aislante térmico tiene un gran efecto en el ahorro que se proporciona en la demanda energética, sobre todo en las zonas climáticas de inviernos severos y muy severos siendo, a nivel general, el ahorro proporcionado por el PCM muy inferior. Sin embargo, en los otros dos periodos de construcción las diferencias frente a las otras tipologías son debidas al aislante que la normativa exige para dichos periodos y, que como ya se ha comprobado, no favorece al comportamiento del PCM en este tipo de edificio. Por ello, en los periodos de construcción 2008-2019 y 2020-Act, aunque el PCM proporcione ahorro con respecto al EPS en las mismas zonas climáticas que para el resto de las tipologías, la diferencia entre estos ahorros es bastante inferior a la obtenida en las tipologías de vivienda unifamiliar y bloque de viviendas de 3 plantas.

En cuanto a la mejora de confort, las conclusiones adoptadas son las mismas que para el resto de las tipologías [Apartado 5.3.1].

Como se ha podido comprobar, la solución de integrar PCM en los cerramientos proporciona ahorros más significativos que el aislante térmico en el periodo de construcción en el que la exigencia de aislante es mayor. Así pues, se puede concluir que dicho ahorro será cada vez más notorio conforme la normativa avance y sea más estricta. Por tanto, se estima un futuro favorable para la implementación de PCM en la envolvente de los edificios ya que la normativa tiende a ser cada vez más exigente.

## 6. ANÁLISIS ECONÓMICO

La solución PCM es bastante más costosa que la solución de implementar aislante térmico [24], [25]. Por ello, aunque el PCM produzca mayores ahorros que el aislamiento térmico en algunas de las zonas climáticas de los periodos de construcción 1981-2007 y 2008-2019, en estos se optará por implementar aislante térmico, ya que los ahorros que proporciona el PCM con respecto al aislamiento no son significativos. Sin embargo, se ha podido comprobar que en aquellos edificios que ya cumplen con las exigencias de aislamiento que marca el CTE DB-HE 2019, para cualquier clima y tipología con las características de vivienda unifamiliar y bloque de viviendas de 3 plantas, la solución PCM proporciona ahorros notorios frente al aislante térmico.

Por ello, resulta interesante que, para estos casos concretos donde el PCM proporciona un ahorro significativo frente al aislante, se evalúe y compare su rentabilidad económica.

Debido a la variabilidad y situación actual del precio de la energía (electricidad y gas), para el presente análisis económico se han considerado los siguientes tres escenarios:

- ESCENARIO 1: Precio medio de la energía durante el periodo 2018-2020, previo a la actual crisis energética.
- ESCENARIO 2: Precio medio de la energía en el año 2021, en el que comenzó la crisis energética actual.
- ESCENARIO 3: Precio medio de la energía en el año 2023 según el mercado a futuro OMIP en la fecha consultada.

Definidos los escenarios anteriores y, considerando para el consumo eléctrico un contrato acogido a la tarifa del Precio Voluntario para el Pequeño Consumidor (PVPC) y, para el consumo de gas, un contrato acogido a la Tarifa de Último Recurso (TUR), el precio medio del gas y la electricidad sin impuestos en cada uno de los escenarios se corresponde con los indicados en las Tabla 18 y Tabla 19.

El coste del consumo en la tarifa PVPC está compuesto por el precio horario resultante del mercado diario de la energía, gestionado por el Operador del Mercado Ibérico de la Electricidad (OMIE), los servicios de ajuste gestionados por Red Eléctrica de España en calidad de operador del sistema, además de otros costes recogidos en la normativa vigente que dependen del periodo (punta, valle o llano) en el que se efectúe el consumo [29]. Por ello, se toma como referencia para el cálculo del ahorro económico en el consumo de refrigeración el precio que establece OMIE, ya que a partir de éste se obtiene el precio que finalmente pagarán los consumidores.

Para el presente análisis económico sólo se considera el término variable de la factura del gas y la luz ya que se trata del término del que depende el consumo de energía y, por tanto, es a partir del cual se van a generar los ahorros.

PRECIO ELECTRICIDAD [€/kWh]	
Escenario 1	0,04631
Escenario 2	0,11193
Escenario 3	0,148

Tabla 18. Precios de la electricidad en los distintos escenarios considerados [26]-[28].

PRECIO GAS [€/kWh]	
Escenario 1	0,043798
Escenario 2	0,041025
Escenario 3	0,054245*

Tabla 19. Precios del gas en los distintos escenarios considerados [26]-[28].

\*En este caso no se tiene información de precios futuros ya que dichos valores dependen de las publicaciones trimestrales del BOE. Por ello, se ha establecido la misma proporción de variabilidad que se da entre los escenarios 2 y 3 del precio eléctrico.

Los precios del gas natural tomados corresponden con la tarifa TUR2 que está fijada por un consumo anual de gas natural superior a 5.000 kWh/año e inferior a 50.000 kWh/año, límites que se ajustan prácticamente a los consumos obtenidos en la simulación [Anexo 2].

El consumo de energía final se calcula como la relación entre la demanda energética y el rendimiento medio estacional del equipo generador. En las tres tipologías de edificios se supone que dicho equipo está compuesto por una caldera de gas natural para calefacción, y equipos autónomos de expansión directa para refrigeración. El propio DesignBuilder proporciona los valores de este consumo final incorporándole como parámetro de entrada el rendimiento estacional de los equipos generadores. En el Anexo 1 del documento *Anexos*, se especifican los cálculos para obtener el rendimiento medio estacional de estos equipos de generación.

A partir de los consumos de energía final de calefacción y refrigeración, se calculan los ahorros energéticos anuales producidos tanto por la implementación del PCM como por la implementación del aislamiento térmico. En los casos en los que la solución de PCM proporcione un ahorro significativo frente a la solución de aislamiento térmico, se calculan los ahorros económicos anuales en los tres escenarios considerando los costes del gas para el consumo de calefacción y los costes de la electricidad para el consumo de refrigeración. En la siguiente ecuación se indica el cálculo realizado para obtener dicho ahorro anual en cada uno de los escenarios.

$$\text{Ahorro anual} \left[ \frac{\text{€}}{\text{año}} \right] = \text{Ahorro}_{\text{calef}} \left[ \frac{\text{kWh}}{\text{año}} \right] \cdot \text{Coste}_{\text{gas}} \left[ \frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right] + \text{Ahorro}_{\text{ref}} \left[ \frac{\text{kWh}}{\text{año}} \right] \cdot \text{Coste}_{\text{elect}} \left[ \frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right]$$

Dichos resultados se exponen en el Anexo 3 del documento *Anexos*.

A continuación, se muestra parte de los resultados obtenidos ya que, al no darse una gran variabilidad entre los resultados de los distintos casos de estudio, es suficiente ver la tendencia de algunos de éstos para obtener las conclusiones. En la Tabla 20, se indica el ahorro económico anual obtenido por las distintas soluciones en cada uno de los escenarios.

			Ahorro Económico [€/año] Escenario 1	Ahorro Económico [€/año] Escenario 2	Ahorro Económico [€/año] Escenario 3
VIVIENDA UNIFAMILIAR 2020-Act	A4	Caso PCM	44,33	43,92	58,08
		Caso EPS	24,25	23,54	31,13
	E1	Caso PCM	102,86	101,93	134,78
		Caso EPS	60,96	56,28	74,42
BLOQUE VIVIENDAS 3 PLANTAS 2020-Act	A4	Caso PCM	105,69	109,75	145,12
		Caso EPS	98,24	104,56	138,25
	E1	Caso PCM	398,12	391,93	518,23
		Caso EPS	211,01	194,19	256,76

Tabla 20. Ahorro económico anual obtenido por las distintas soluciones en cada uno de los escenarios.

Se puede observar que, las diferencias entre los ahorros anuales proporcionados en los distintos escenarios son más significativas en el escenario 3. Esto se debe a que dicho ahorro anual está prácticamente proporcionado por el ahorro que se produce en el consumo de calefacción y, según los criterios para la selección de escenarios, los costes del gas natural en los escenarios 1 y 2 son muy similares e inferiores al del escenario 3.

También puede apreciarse que las diferencias económicas entre los ahorros anuales proporcionados por la implantación de PCM o aislante térmico no son elevadas. Por ello, es conveniente comparar la inversión que supone cada una de estas soluciones y obtener su PayBack a partir de las siguientes ecuaciones:

$$\text{PayBack}_{\text{PCM}} [\text{años}] = \frac{\text{Inversión} [\text{€}]}{\text{Ahorro anual} \left[ \frac{\text{€}}{\text{año}} \right]} = \frac{e_{\text{PCM}}[\text{m}] \cdot S_{\text{muro}}[\text{m}^2] \cdot \rho_{\text{PCM}} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \cdot \text{Coste}_{\text{PCM}} \left[ \frac{\text{€}}{\text{kg}} \right]}{\text{Ahorro anual} \left[ \frac{\text{€}}{\text{año}} \right]}$$

$$\text{PayBack}_{\text{EPS}} [\text{años}] = \frac{\text{Inversión} [\text{€}]}{\text{Ahorro anual} \left[ \frac{\text{€}}{\text{año}} \right]} = \frac{S_{\text{muro}}[\text{m}^2] \cdot \text{Coste}_{\text{EPS}} \left[ \frac{\text{€}}{\text{m}^2} \right]}{\text{Ahorro anual} \left[ \frac{\text{€}}{\text{año}} \right]}$$

En la Tabla 21, se muestra la inversión que supondría dichas soluciones en cada zona climática y, en la Tabla 22 se indica el PayBack obtenido de los casos reflejados en la tabla de ahorro económico.

Para calcular el coste de la inversión de cada una de las soluciones a implementar mediante las ecuaciones mostradas previamente, se han considerado los siguientes costes unitarios [24], [25]:

- Coste aislante térmico panel EPS 30 cm espesor: 10,52 €/m<sup>2</sup>
- Coste aislante térmico panel EPS 50 cm espesor: 13,28 €/m<sup>2</sup>

- Coste material cambio de fase HS22: 2 €/kg

		A4	B3	C2	D3	E1
<b>VIVIENDA UNIFAMILIAR 2020-Act</b>	Inversión PCM	7.731,76	7.731,76	11.597,63	19.329,39	19.329,39
	Inversión EPS	1.231,65	1.231,65	1.231,65	1.554,78	1.554,78
<b>BLOQUE DE VIVIENDAS 3 PLANTAS 2020-Act</b>	Inversión PCM	20.074,18	20.074,18	30.111,27	50.185,45	50.185,45
	Inversión EPS	3.197,76	3.197,76	3.197,76	4.036,72	4.036,72

Tabla 21. Inversión [en €] de las soluciones consideradas en cada zona climática.

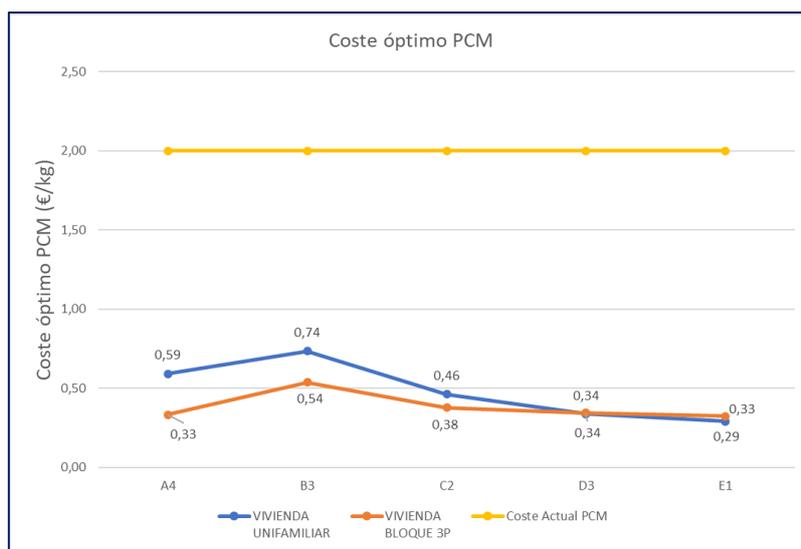
			PayBack [años] Escenario 1	PayBack [años] Escenario 2	PayBack [años] Escenario 3
<b>VIVIENDA UNIFAMILIAR 2020-Act</b>	<b>A4</b>	Caso PCM	>100	>100	>100
		Caso EPS	51	53	40
	<b>E1</b>	Caso PCM	>100	>100	>100
		Caso EPS	26	28	21
<b>BLOQUE VIVIENDAS 3 PLANTAS 2020-Act</b>	<b>A4</b>	Caso PCM	>100	>100	>100
		Caso EPS	33	31	23
	<b>E1</b>	Caso PCM	>100	>100	97
		Caso EPS	19	21	16

Tabla 22. PayBack de las soluciones consideradas.

A partir del presente estudio económico, se evidencia la gran inversión que requiere la implementación de materiales de cambio de fase en la envolvente de los edificios. Esto, sumado a que los ahorros anuales que proporciona no son muy elevados, ocasiona que se presenten periodos de retorno de la inversión inasumibles en la mayoría de los casos.

Por tanto, a día de hoy puede concluirse que los materiales de cambio de fase no pueden competir desde un punto de vista económico con la implementación de aislamiento térmico como mejora de la eficiencia energética en la envolvente de los edificios. Esto se debe principalmente a que se trata de un material con relativamente pocos años de experiencia y con procesos de fabricación que todavía no están completamente optimizados. Además, un aspecto muy importante e influyente es que, al presentar muy poca demanda no hay economía de escala y por ello los precios actuales son tan elevados haciendo inviable la sustitución del aislante térmico, que ya es una tecnología muy madura, por este material novedoso.

La siguiente gráfica muestra para un escenario concreto, ya que para el resto se obtiene valores muy similares [Anexo 3], hasta qué valor debería disminuir el precio del material de cambio de fase para llegar a ser competitivo con el aislamiento térmico y presentar un plazo de retorno de la inversión igual o inferior que éste.



**Figura 42. Coste óptimo del PCM para ser competitivo con el aislamiento térmico.**

Se puede comprobar que, conforme la severidad invernal aumenta y la cantidad de espesor óptima de PCM requerida en la climatología es mayor, su coste para equipararse y competir con es aislante disminuye, aunque en dichas zonas climáticas proporcione mayores porcentajes de ahorros con respecto al aislamiento térmico. Para que dicho material innovador pueda compararse con la solución ya madura de aislamiento térmico, tiene que reducir aproximadamente su precio base en un 65-85%.

Después de este análisis, es evidente que es necesario seguir avanzando en la investigación de los materiales de cambio de fase con el fin de que lleguen a mejorar notablemente su potencialidad de ahorro energético y puedan disminuir así los periodos de retorno de inversión que actualmente presentan.

## 7. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE TRABAJO

En el presente Trabajo Fin de Máster se han analizado 135 casos, definidos en función de tres tipologías de edificios y cinco zonas climáticas típicas, así como de las principales actualizaciones de la normativa a lo largo de su evolución en España, para observar la potencialidad y comportamiento de la implementación de materiales de cambio de fase en los muros exteriores de edificios residenciales.

El objetivo del proyecto es contribuir y profundizar en la investigación de la integración de estos materiales en la envolvente térmica de los edificios residenciales a partir de las conclusiones energéticas y económicas obtenidas. A continuación, se resumen dichas conclusiones que cumplen con el objetivo principal del trabajo, ya que presentan una serie de razonamientos y realidades muy interesantes sobre el comportamiento de estos materiales en los diversos escenarios de aplicación.

- En los climas analizados, los ahorros totales obtenidos en el consumo de energía final con la implementación del PCM se deben principalmente al ahorro que este proporciona en la demanda de calefacción. Por tanto, su potencialidad y comportamiento van a estar condicionados por la ubicación del edificio con respecto al resto de edificios vecinos (si está más o menos protegido) así como por la severidad de clima invernal a la que esté expuesto el edificio.
- El aislamiento térmico que integra el cerramiento tiene una gran repercusión sobre el comportamiento del PCM asegurando que, en edificios que perciban una climatología de inviernos suaves o muy suaves dicha solución producirá mayores ahorros energéticos si estos presentan bajos espesores de aislante y, por el contrario, en edificios que expuestos a una climatología de inviernos muy severos dicha solución tendrá mejores rendimientos si los espesores de aislante son notables.
- La orientación de la solución también presenta efectos sobre el ahorro que pueda generar. En aquellos casos en los que el PCM se integre en el cerramiento orientado al sur, este deberá presentar bajos espesores de aislamiento para la mayoría de los climas (exceptuando en zonas climáticas de inviernos muy severos) con el propósito de facilitar la interacción del material con el exterior y proporcionar mayores ahorros.
- La implementación de PCM en cerramientos de edificios de bajas compacidades proporcionará mayores ahorros energéticos por superficie para cualquiera de las zonas climáticas.
- En los periodos de construcción en los que la exigencia de aislamiento es baja, la inclusión de éste tiene un gran efecto en el ahorro que se proporciona en la demanda energética siendo dicho ahorro, sobre todo en las zonas climáticas de inviernos severos, mayor al que puede proporcionar el PCM. Sin embargo, en edificios donde el espesor de aislante es más notable debido a las exigencias de la normativa, el ahorro que proporciona el PCM es superior al que se genera añadiendo más aislante del ya establecido por la normativa para cualquiera de las zonas climáticas. La diferencia de los

ahorros proporcionados por estas dos soluciones va a depender notablemente de la tipología de edificio.

- La implementación de PCM no siempre proporciona un mayor confort que la integración de aislamiento térmico y, un mayor confort proporcionado por el PCM no siempre conlleva directamente un mayor ahorro.
- A día de hoy, la sustitución del aislante térmico por este material innovador resulta económicamente inviable debido a los elevados periodos de retorno que presenta dicha solución. Por ello, es necesario seguir avanzando en su investigación y desarrollo con el fin de que se lleguen a optimizar sus procesos de fabricación y con el propósito de obtener mejores resultados energéticos.

A partir de la realización del presente proyecto y de los resultados obtenidos, se idean los siguientes estudios y posibles mejoras:

- Evaluación del rendimiento de materiales de cambio de fase para distintas orientaciones en un conjunto más amplio de zonas climáticas.
- Estudio similar al realizado en el presente trabajo, pero desarrollando los cálculos con otras herramientas de simulación (p.ej. TRNSYS), con el fin de comparar los resultados generados por los diferentes motores de cálculo, y analizar cuál de ellos resulta más completo y específico.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] S.R Leiteda Cunha and J.L. Barrosode Aguiar. "Phase change materials and energy efficiency of buildings: A review of knowledge," *Journal of Energy Storage*, vol. 27, (2020), doi: 10.1016/J.EST.2019.101083.
- [2] "IEA – International Energy Agency." *World Energy Statistics and Balances*, 2019.
- [3] B. Lamrani, K. Johannes, and F. Kuznik, "Phase change materials integrated into building walls: An updated review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 140, (2021), doi: 10.1016/j.rser.2021.110751.
- [4] Certificados energéticos- La inercia térmica en la construcción de edificios eficientes. [Online]. Disponible: <https://www.certificadosenergeticos.com/inercia-termica-construcción-edificios-eficientes> [Último acceso: 6 de febrero de 2022].
- [5] M. Amorós García. "Análisis de la viabilidad de usar materiales con PCM en edificación." Trabajo Final de Máster. Universidad Politécnica de Cataluña, 2021.
- [6] H. Jamil, M. Alam, J. Sanjayan, and J. Wilson, "Investigation of PCM as retrofitting option to enhance occupant thermal comfort in a modern residential building," *Energy and Buildings*, vol. 133, pp. 217–229, (2016), doi: 10.1016/j.enbuild.2016.09.064.
- [7] A. Sharma, V. V. Tyagi, C. R. Chen, and D. Buddhi, "Review on thermal energy storage with phase change materials and applications," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, no. 2, pp. 318–345, (2009) doi: 10.1016/j.rser.2007.10.005.
- [8] D. A. Chwieduk, "Dynamics of external wall structures with a PCM Phase Change Materials) in high latitude countries," *Energy*, vol. 59, pp. 301–313 (2013), doi: 10.1016/j.energy.2013.06.066.
- [9] A. Oliver, F. J. Neila, and A. García-Santos, "PCM choosing and classification according to their characteristics for their application for thermal energy storage systems", vol. 62, pp. 131–140 (2012), doi: 10.3989/mc.2012.58010.
- [10] Q. Al-Yasiri and M. Szabó, "Incorporation of phase change materials into building envelope for thermal comfort and energy saving: A comprehensive analysis," *Journal of Building Engineering*, vol. 36, (2021), doi: 10.1016/j.job.2020.102122.
- [11] M. Moscoso. "Aplicación de los materiales de cambio de fase en el mobiliario interior como reguladores de temperatura." Universidad Politécnica de Cataluña, 2016.
- [12] G. Hua Tian, H. Lin Lv, J. en Huang, P. Liu, and W. Feng, "Experimental study on the thermal performance of a wall coated with a phase-change, energy-storing

- mortar layer during summer,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 124, pp. 279–285 (2017), doi: 10.1016/j.applthermaleng.2017.05.178.
- [13] E. Santiago, “Segmentación del parque residencial de viviendas en España en clústeres tipológicos. Estudio para la ERESEE 2020. Subdirección General de Políticas Urbanas. Ministerio de Fomento, 2019.
- [14] Y. Cascone, A. Capozzoli, and M. Perino, “Optimisation analysis of PCM-enhanced opaque building envelope components for the energy retrofitting of office buildings in Mediterranean climates,” *Applied Energy*, vol. 211, pp. 929-953, (2018), doi: 10.1016/j.apenergy.2017.11.081.
- [15] M. Arıcı, F. Bilgin, S. Nižetić, and H. Karabay, “PCM integrated to external building walls: An optimization study on maximum activation of latent heat,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 165 (2020), doi:10.1016/j.applthermaleng.2019.114560.
- [16] Q. Al-Yasiri and M. Szabó, “Selection of phase change material suitable for building heating applications based on qualitative decision matrix,” *Energy Conversion and Management: X*, vol. 12, (2021) doi: 10.1016/j.ecmx.2021.100150.
- [17] R. Pérez Gallardo, “Optimización de la temperatura de cambio de fase en PCM para refrigeración módulos fotovoltaicos en función de las condiciones climáticas,” Universidad de Sevilla, 2018.
- [18] Rubitherm GmbH - PCMs Product Range. [Online]. Disponible: <https://www.rubitherm.eu/> [Último acceso: 13 de mayo de 2022].
- [19] PLUSS® - PCMs Product Range. [Online]. Disponible: <https://pluss.co.in/> [Último acceso: 13 de mayo de 2022].
- [20] A. Ordoñez García, “DesignBuilder - Manual de ayuda. Versión del programa 5.” Marzo 2017.
- [21] R. A. Kishore, M. V. A. Bianchi, C. Booten, J. Vidal, and R. Jackson, “Parametric and sensitivity analysis of a PCM-Integrated wall for optimal thermal load modulation in lightweight buildings,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 187 (2021), <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.116568>.
- [22] M. Vautherot, F. Maréchal, and M. M. Farid, “Analysis of energy requirements versus comfort levels for the integration of phase change materials in buildings,” *Journal of Building Engineering*, vol. 1, pp. 53–62, (2015), doi: 10.1016/j.job.2015.03.003.
- [23] Intelligent Energy-Europe Programme. “Construye 2020. Perfeccionamiento de formadores en EE y EERR.”

- [24] CYPE Ingenieros, S.A. Generador de precios de la construcción. España. [Online]. Disponible: <http://www.generadordeprecios.info/#gsc.tab=0> [Último acceso: 23 de mayo de 2022].
- [25] Contact us – PLUS<sup>®</sup>- PCMs Product Range. [Online]. Disponible: <https://pluss.co.in/contact-us/> [Último acceso: 17 de mayo de 2022].
- [26] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. “Resolución de la Dirección General de Política Energética y Minas, por la que se publica la tarifa de último recurso de gas natural.” BOE nº309, de 25/12/2021, pp.162819-22
- [27] OMIE - OMI, Polo Español S.A. [Online]. Disponible: <https://www.omie.es/> [Último acceso: 17 de mayo de 2022].
- [28] OMIP – Mercado de Futuros. [Online]. Disponible: <https://www.omip.pt/es> [Último acceso: 17 de mayo de 2022].
- [29] REE – Red Eléctrica de España. [Online]. Disponible: <https://www.ree.es/es> [Último acceso: 17 de mayo de 2022].
- [30] IDAE - Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico. Estudios, informes y estadísticas, 2019

## 9. ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Porcentaje sectorial de consumo de energía final y emisiones a nivel global, 2019 .....	1
Figura 2. Estructura del consumo energético del sector residencial por usos finales, 2019.....	1
Figura 3. Estructura sectorial del consumo de energía final, 2019.....	1
Figura 4. Número de artículos publicados sobre PCM entre 1996 y 2018 .....	2
Figura 5. Número de publicaciones según la incorporación del PCM en los diferentes elementos constructivos .....	3
Figura 6. Efecto de la inercia térmica en la temperatura interior del edificio .....	5
Figura 7. Comparación capacidad de almacenamiento de PCM con materiales construcción. ...	5
Figura 8. Energía térmica almacenada en el material frente a temperatura. ....	6
Figura 9. Inmersión de una placa de yeso en un PCM. ....	10
Figura 10. Formas de macroencapsulación.....	10
Figura 11. PCM microencapsulado (izquierda) y placa de yeso con PCM microencapsulado (derecha). ....	11
Figura 12. Utilización de técnicas de incorporación de los PCM. ....	12
Figura 13. Metodología seguida en el estudio. ....	13
Figura 14. Matriz de definición de los clústeres de vivienda con volumetrías según el estudio “Segmentación del parque residencial de viviendas en España en clústeres tipológicos”. ....	15
Figura 15. Plano planta general de los pisos en la vivienda unifamiliar.....	17
Figura 16. Plano planta general de los pisos en el bloque viviendas 3 plantas. ....	17
Figura 17. Plano planta general de los pisos en el bloque viviendas de más de 3 plantas. ....	17
Figura 18. PCM lado interior cerramiento.....	21
Figura 19. PCM lado exterior cerramiento.....	21
Figura 20. Porcentaje de ahorro en función del cambio en el intervalo del espesor de PCM para cada zona climática. ....	23
Figura 21. Plantas de la vivienda unifamiliar.....	26
Figura 22. Modelo 3D vivienda unifamiliar mediante el software DesignBuilder. ....	28
Figura 23. Planta Baja del bloque de viviendas 3 plantas. ....	29
Figura 24. Plantas que integran viviendas del bloque de viviendas 3 plantas.....	29
Figura 25. Modelo 3D bloque de viviendas 3 plantas mediante el software DesignBuilder. ....	31
Figura 26. Planta Baja del bloque de viviendas de más de 3 Plantas.....	31
Figura 27. Plantas que integran viviendas del bloque de viviendas de más de 3 plantas. ....	32
Figura 28. Modelo 3D bloque de viviendas de más de 3 plantas mediante el software DesignBuilder. ....	33
Figura 29. Demanda energética según tipología para el periodo de construcción 1981-2007. .	35
Figura 30. Demanda energética según tipología para el periodo de construcción 2008-2019. .	35
Figura 31. Demanda energética según tipología para el periodo de construcción 2020-Act. ....	35
Figura 32. Ahorro energético anual en viviendas unifamiliar según periodo de construcción ..	36
Figura 33. Ahorro energético anual en bloques de vivienda de 3 plantas según periodo de construcción. ....	36
Figura 34. Ahorro energético anual en bloques de vivienda de más de 3 plantas según periodo de construcción. ....	37
Figura 35. Comparación de la radiación incidente a lo largo de un año recibida en los muros exteriores de cada orientación y en la cubierta plana .....	38
Figura 36. Ahorro energético anual en el periodo de construcción 2008-2019 según tipología. 39	

Figura 37. Ahorro energético anual en el periodo de construcción 1981-2007 según tipología	39
Figura 38. Ahorro energético anual en el periodo de construcción 2020-Act según tipología ..	39
Figura 39. Ahorro energético y mejora de confort que proporcionan las distintas soluciones en la vivienda unifamiliar para cada periodo de construcción. ....	40
Figura 40. Ahorro energético y mejora de confort que proporcionan las distintas soluciones en el bloque de viviendas de 3 plantas para cada periodo de construcción. ....	42
Figura 41. Ahorro energético y mejora de confort que proporcionan las distintas soluciones en el bloque de viviendas de más de 3 plantas para cada periodo de construcción.....	43
Figura 42. Coste óptimo del PCM para ser competitivo con el aislamiento térmico.....	48

## 10. ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características de los PCM orgánicos. ....	8
Tabla 2. Características de los PCM inorgánicos. ....	9
Tabla 3. Estándares considerados en el estudio y normativa que les aplica. ....	16
Tabla 4. Parámetros geométricos que definen las características de los clústeres considerados en el estudio “Segmentación del parque residencial de viviendas en España en clústeres tipológicos” .....	16
Tabla 5. Características de los PCM. ....	19
Tabla 6. Ahorro en la demanda térmica en función del tipo de PCM. ....	20
Tabla 7. Ahorro en la demanda térmica en función de las diferentes posiciones del PCM en el cerramiento. ....	21
Tabla 8. Resumen de los casos de estudio. ....	24
Tabla 9. Parámetros geométricos vivienda unifamiliar 1981-2007 y 2008-2019. ....	27
Tabla 10. Alturas de techo a techo entre las plantas de vivienda unifamiliar 2020-Act. ....	27
Tabla 11. Dimensiones y superficie de los huecos en la vivienda unifamiliar para cada periodo de construcción. ....	28
Tabla 12. Parámetros geométricos bloque de viviendas 3 plantas 1981-2007 y 2008-2019. ....	30
Tabla 13. Alturas de techo a techo entre las plantas del bloque de viviendas de 3 plantas 2020-Act. ....	30
Tabla 14. Dimensiones y superficie de los huecos en el bloque de viviendas de 3 plantas para cada periodo de construcción. ....	30
Tabla 15. Parámetros geométricos bloque de viviendas de más de 3 Plantas 1981-2007 y 2008-2019. ....	32
Tabla 16. Alturas de techo a techo entre las plantas del bloque de viviendas de más de 3 plantas 2020-Act. ....	33
Tabla 17. Dimensiones y superficie de los huecos en el bloque de viviendas de más de 3 plantas para cada periodo de construcción. ....	33
Tabla 18. Precios de la electricidad en los distintos escenarios considerados. ....	45
Tabla 19. Precios del gas en los distintos escenarios considerados. ....	45
Tabla 20. Ahorro económico anual obtenido por las distintas soluciones en cada uno de los escenarios. ....	46
Tabla 21. Inversión de las soluciones consideradas en cada zona climática. ....	47
Tabla 22. PayBack de las soluciones consideradas. ....	47