



Escola Politècnica Superior  
d'Edificació de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

## **MÁSTER DE EDIFICACIÓN PROYECTO FINAL DE MÁSTER**

### **ANÁLISIS DE LA VIABILIDAD DE USAR MATERIALES CON PCM EN EDIFICACIÓN**

**Estudiant:** Mireia Amorós García

**Director/s:** Ana María Lacasta Palacio / Laia Haurie Ibarra

**Convocatòria:** Junio 2011



## **Resumen.**

En este proyecto se analiza la viabilidad de utilizar materiales de cambio de fase (PCM) en edificación. Estos materiales tienen la capacidad de almacenar energía en forma de calor latente.

En primer lugar se presenta una introducción a los materiales PCM y a la teoría de su comportamiento. Analizando estos puntos, se pone de manifiesto la abundancia y diversidad que existe de estos materiales, así como el amplio abanico de posibilidades y usos que presentan, no sólo en edificación.

Una vez elegidos los materiales PCM a estudiar, se realizan experimentos en el laboratorio del fuego de la EPSEB. Se realizan diferentes ensayos a las muestras para obtener datos numéricos sobre sus propiedades y comportamientos térmicos. Además, se elaboran y ensayan placas de materiales de construcción (yeso, cemento y polímeros termoestables) que incorporan PCM en su composición. De los datos obtenidos, se escoge al yeso como material con mayor viabilidad, y por lo tanto, se decide continuar con el en los experimentos restantes del proyecto.

A continuación, se construye un dispositivo experimental consistente en dos cubículo de dimensiones 24x24x33cm. Uno está construido con yeso con PCM, mientras que el otro con yeso convencional. En los dos casos se registran datos del mismo modo. Se observa como el cubículo con PCM mientras se produce el cambio de fase, presenta una mayor inercia térmica y por tanto, un mayor confort térmico interior en relación al cubículo sin PCM.

El siguiente punto del proyecto, se centra en la realización de simulaciones del comportamiento de PCM en diferentes tipos de paredes. Estas simulaciones se basan en la resolución numérica de las ecuaciones que describen los procesos térmicos que sufren. Tras validar el programa desarrollado con los resultados experimentales del laboratorio, se han realizado simulaciones correspondientes a paredes de dimensiones reales, variando el número y composición de sus capas.

En la última parte del proyecto se realiza al análisis del coste energético en sistemas de climatización y por lo tanto ahorro económico, que conlleva la introducción de materiales PCM en las paredes de una vivienda. Para ello se utiliza el programa comercial PCM Express. En todas las pruebas realizadas se observa que el encarecimiento inicial derivado del uso de PCM en construcción, se ve compensado por el ahorro energético que supone.



# **ÍNDICE**

## **GLOSARIO**

## **INTRODUCCIÓN**

<b>1. Introducción a los PCMs.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Almacenamiento de calor latente.....</b>	<b>1</b>
<b>1.2 Técnicas experimentales para obtener el valor de calor latente. DSC. DTA ....</b>	<b>3</b>
<b>1.3 Clasificación de los PCM.....</b>	<b>5</b>
<b>1.4 Usos de los PCM.....</b>	<b>7</b>
<b>1.5 Los PCM en edificación.....</b>	<b>9</b>
<b>2. Ensayos en laboratorio de PCM y de materiales que los incorporan.....</b>	<b>17</b>
<b>2.1 Descripción de procedimientos e instrumentos utilizados.....</b>	<b>18</b>
<b>2.2 Caracterización de los PCM.....</b>	<b>19</b>
2.2.1 Observación del material PCM con microscopio óptico	
2.2.2 Observación con el microscopio electrónico.	
2.2.3 Datos obtenidos del DSC.	
<b>2.3 Ensayos realizados en muestras de yeso con PCM.....</b>	<b>38</b>
2.3.1 Preparación de placas.	
2.3.2 Obtención de propiedades de las placas.	
2.3.3 Experimentos a escala de laboratorio.	
2.3.4 Ensayos mecánicos en probetas prismáticas.	
<b>2.4 Ensayos realizados en muestras de cemento con PCM.....</b>	<b>55</b>
2.4.1 Preparación de placas.	
2.4.2 Experimentos a escala de laboratorio.	
<b>2.5 Ensayos realizados en muestras de polímeros termoestables con PCM.....</b>	<b>59</b>
2.5.1 Preparación de probetas de resinas epoxi y de poliéster.	
2.5.2 Observación de la resina poliéster con PCM en el microscopio electrónico.	
2.5.3 Experimentos a escala de laboratorio.	
<b>3. Ensayos realizados en un cubículo a pequeña escala.....</b>	<b>69</b>
<b>3.1 Preparación de los cubículos de ensayo.....</b>	<b>69</b>
<b>3.2 Observaciones mediante cámara termográfica .....</b>	<b>71</b>
<b>3.3 Procedimiento experimental.....</b>	<b>74</b>
<b>3.4 Análisis de resultados.....</b>	<b>75</b>
<b>4. Simulaciones numérica del comportamiento térmico de yeso con PCM.....</b>	<b>79</b>
<b>4.1 Modelo matemático utilizado en el programa informático.....</b>	<b>79</b>
<b>4.2 Comprobación de la fiabilidad del programa creado.....</b>	<b>81</b>
<b>4.3 Simulaciones térmicas de paredes con varias capas.....</b>	<b>84</b>

<b>4.4 Simulaciones utilizando datos de temperaturas exteriores reales.....</b>	<b>91</b>
<b>5. Simulaciones creadas con el programa PCM EXPRESS .....</b>	<b>97</b>
<b>5.1 Parámetros que varían en cada simulación.....</b>	<b>97</b>
<b>5.2 Características comunes de la vivienda.....</b>	<b>99</b>
<b>5.3 Composiciones de las paredes utilizadas en las simulaciones.....</b>	<b>101</b>
<b>5.4 Tablas comparativas. Sevilla.....</b>	<b>102</b>
<b>5.5 Tablas comparativas. Soria.....</b>	<b>103</b>
<b>5.6 Análisis de los dos mejores resultados y conclusiones.....</b>	<b>104</b>

## **CONCLUSIONES**

## **BIBLIOGRAFÍA**

## **ANEXOS**

**I. Ejemplos de sustancias y mezclas que se utilizan como PCM.**

**II. Características físicas y químicas de PCM que se comercializan en el mercado actualmente.**

**III. Descripción de ensayos realizados a PCM y materiales de construcción con PCM en su composición.**

**IV: Características de los materiales termoestables.**

**V: Programas creados con lenguaje fortran, para la realización de simulaciones.**

**VI: Normativa aplicada a la vivienda creada para el PCM EXPRESS.**

**VII: Resultados obtenidos de cada simulación creada con el programa PCM EXPRESS.**

**VIII: Referencia a proyectos de edificación que incluyen materiales PCM.**

## GLOSARIO

**Calor específico:** Cantidad de calor necesaria para elevar la temperatura de una unidad de masa de una sustancia un grado. En el Sistema Internacional de unidades, el calor específico se expresa en julios por kilogramo y grados Kelvin; en ocasiones también se expresa en calorías por gramo y por grado centígrado. El calor específico del agua es una caloría pro gramo y grado centígrado, es decir, hay que suministrar una caloría a un gramo de agua para elevar su temperatura un grado centígrado.

**Calor latente:** o calor de cambio de estado, es la energía absorbida por las sustancias al cambiar de estado, de sólido a líquido (calor latente de fusión) o de líquido a gaseoso (calor latente de vaporización). Al cambiar de gaseoso a líquido y de líquido a sólido se devuelve la misma cantidad de energía. Por el contrario, el calor que se aplica cuando la sustancia no cambia de estado, aumenta la temperatura y se llama calor sensible.

**Entalpía de fusión:** Cantidad de calor que es absorbido para realizar el cambio de estado. El material absorbe calor, pero su temperatura se mantiene constante, porque este calor se gasta en producir el cambio de estado. También se puede llamar calor latente (oculto).

**Conductividad térmica ( $\lambda$ ):** es una propiedad física de los materiales, que mide la capacidad de conducción de calor. Es la capacidad de una sustancia de transferir la energía cinética de sus moléculas a otras adyacentes o s sustancias con las que esta en contacto. En el sistema internacional:  $\lambda: W/(K*m)$ . También se expresa en  $J/(s*^{\circ}C*m)$ .

Es una magnitud intensiva. Su magnitud inversa es la resistividad térmica, que es la capacidad de los materiales a oponerse al paso del calor.

**Transmitancia térmica (U):** es la cantidad de energía que atraviesa, en la unidad de tiempo, una unidad de superficie de un elemento constructivo de caras planas paralelas cuando entre dichas caras hay un gradiente térmico unidad. Es el inverso a la resistencia térmica. En el sistema internacional:  $U: W/(m^2*K)$ .

El concepto de transmitancia térmica se usa en construcción para el cálculo de los aislamientos y pérdidas energéticas. De este mismo concepto se parte para los cálculos de los diseños de calefacción, en cualquiera de sus modalidades, al estar, en esencia, basada la calefacción en determinar la cantidad de energía que hay que suministrar a los espacios

## Análisis de la viabilidad de usar materiales con PCM en edificación

habitados en la unidad de tiempo (potencia) para mantener una determinada temperatura (la de comodidad) en una determinada diferencia con la temperatura exterior. Esta potencia debe compensar las pérdidas de calor por los elementos constructivos que separan los espacios calefactados del exterior o de cualquier otro ambiente a menor temperatura, es decir, depende de la transmitancia de los elementos que definen la estancia a calefactar

**Eutético:** es una mezcla de dos componentes con punto de fusión (solidificación) o punto de vaporización (licuefacción) mínimo, inferior al correspondiente a cada uno de los compuestos en estado puro. Esto ocurre en mezclas que poseen alta estabilidad en estado líquido, cuyos componentes son insolubles en estado sólido.

**Sub-enfriamiento:** Este fenómeno se presenta en sustancias puras. Es cuando un líquido llega a su temperatura de solidificación y este permanece sin congelarse ni solidificarse y permanece en estado líquido.

**HVAC:** HVAC (Calefacción, Ventilación y Aire Acondicionado), se refiere a la tecnología de confort ambiental interior o del automóvil. El diseño del sistema HVAC es una especialidad importante de la ingeniería mecánica, basado en los principios de la termodinámica, mecánica de fluidos y transferencia de calor. Refrigeración a veces se añade a la abreviatura del campo como HVAC & R o HVACR, ventilación o se ha caído como en HACR (tales como la designación de los interruptores de circuito HACR-clasificado).

## **Introducción.**

Debido a la actual necesidad de ahorro energético y aspectos de sostenibilidad, en edificación se buscan materiales con formas de almacenamiento de calor pasivo, que puedan proporcionar a la edificación una mayor capacidad de inercia térmica.

El objetivo principal de este proyecto es, como anuncia el título, analizar la viabilidad de utilizar materiales de cambio de fase (PCM) en edificación.

El trabajo se enmarca dentro de una línea de investigación en la EPSEB, donde previamente se desarrolló una primera tesina de master de este tema.

Para la obtención del objetivo principal, el proyecto se divide en tres partes.

El primer lugar se realizará un análisis del comportamiento y propiedades de los PCM, así como de materiales de construcción que los incorporan en su composición. Para ello, se llevará a cabo un amplio análisis experimental en las instalaciones del laboratorio del fuego de la EPSEB. Estos experimentos permitirán entender mejor el comportamiento térmico de diferentes materiales (yeso, cemento, polímeros termoestables) con PCM, tanto adquiriendo nuevos conocimientos de sus propiedades como contrastando los resultados experimentales con los resultados que ya eran esperados desde un punto de vista teórico.

A continuación, a partir de las características obtenidas en los ensayos a escala de laboratorio, se desarrollará un programa de simulación que permita obtener el funcionamiento térmico de paredes de diferentes características, sin necesidad de realizar experimentos a gran escala. Con estos valores se obtendrán las primeras conclusiones acerca del comportamiento y una evaluación de la influencia del PCM en el confort térmico.

Por último, se realizará una primera aproximación de la viabilidad técnica (ahorro energético) y económica de la utilización de este material de construcción. Esta podrá servir de base para la realización de estudios más elaborados y precisos.



## **1. Introducción a los PCMs.**

### **1.1. Almacenamiento de calor latente.**

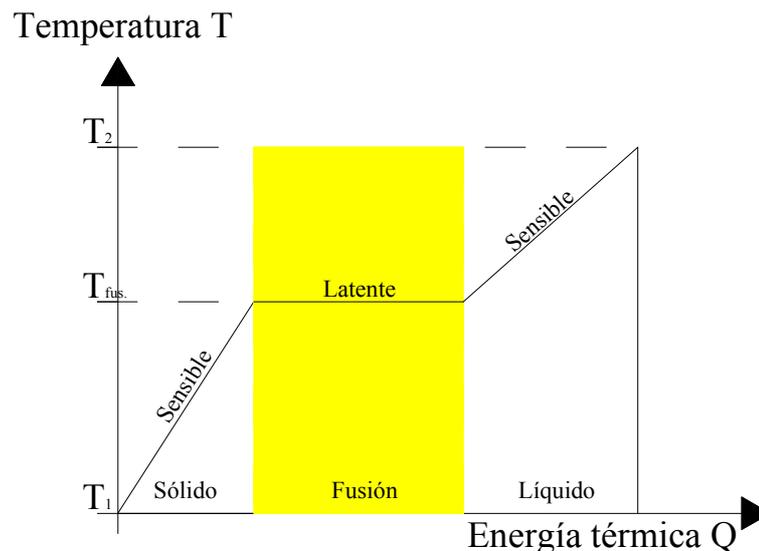
Cuando a un sólido se le suministra calor, va aumentando su temperatura hasta alcanzar su punto de fusión, donde pasa por un cambio de fase, de sólido a líquido. El calor que entra en el sólido, en lugar de gastarse en aumentar la temperatura, lo hace en producir el cambio de fase, por lo que la temperatura del material se mantiene relativamente constante. Hablamos así de calor latente (oculto). Del mismo modo, cuando el proceso de cambio de fase se invierte, es decir, de líquido a sólido, el calor latente almacenado se libera de nuevo a temperatura casi constante. De este modo podemos diferenciar dos tipos de calores, el sensible y el latente.

La figura 1 muestra la diferencia entre calor sensible y calor latente, mediante un gráfico dividido en tres partes:

Primera, la temperatura del sólido aumenta de manera proporcional a la energía térmica suministrada: Calor sensible.

Segunda, la cantidad de energía suministrada sigue aumentando, pero el cuerpo ha llegado a temperatura de fusión y por lo tanto gasta esta cantidad de energía en realizar su cambio de fase. El cuerpo se mantiene a temperatura constante durante el cambio de fase: Calor latente.

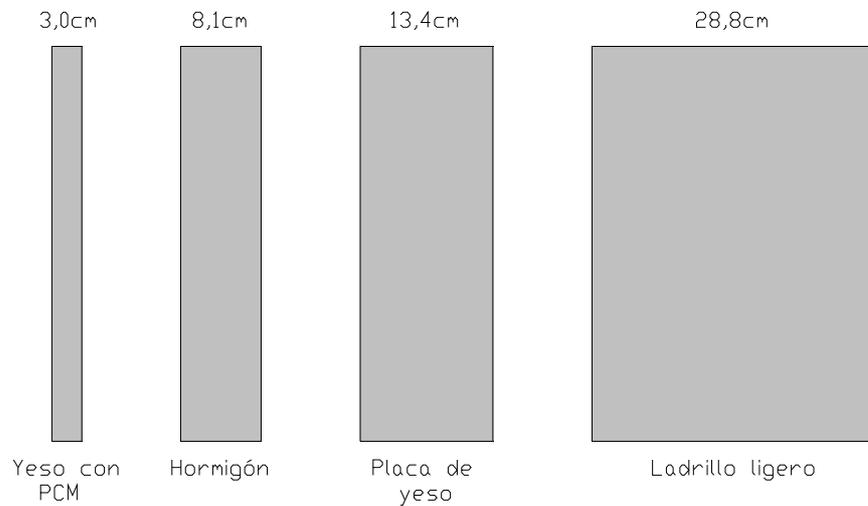
Tercera, el cuerpo se encuentra en estado líquido, y va aumentando su temperatura proporcionalmente a la energía térmica suministrada por el medio: Calor sensible.



**Figura 1.** Gráfico energía térmica frente temperatura.

## 2 Análisis de la viabilidad de usar materiales con PCM en edificación

Durante este proceso de cambio de fase, la cantidad de calor que absorbe el material se conoce como entalpía de fusión. En la siguiente figura se comparan los espesores necesarios en diferentes materiales, para obtener la misma capacidad de almacenamiento de calor.



**Figura 2.** Comparación capacidad de almacenamiento de PCM con materiales construcción.

De este modo queda visualizado cual es la ventaja de los PCM, el uso del calor latente, que está disponible durante el proceso de cambio de fase. Es la energía natural que el PCM utiliza.

Muchos sistemas de almacenamiento de calor, usan solamente el calor sensible, es decir, el cambio de temperatura del material. El calor específico de un material se define mediante la siguiente expresión:

$$Q = m \times C_e \times \Delta T$$

Donde:

Q: cantidad de calor

m: masa

C<sub>e</sub>: calor específico

ΔT: diferencia de temperatura

En una unidad de almacenamiento de calor latente, el calor sensible se ve aumentado por el calor latente. En este caso, el calor específico efectivo se define por la siguiente ecuación:

$$Q = m \times C_e \times \Delta T + m \times \Delta h$$

Donde Δh es la entalpía específica del cambio de fase.

## **1.2. Técnicas experimentales para obtener el valor de calor latente.**

Las técnicas de análisis utilizadas para estudiar el cambio de fase son principalmente la calorimetría diferencial de barrido (DSC) y el análisis térmico diferencial (DTA). Entre los estudios relativos a DSC, vale la pena citar los trabajos de Flaherty [1] para la caracterización de los hidrocarburos y ceras naturales, Giavarini [2] para la caracterización de los productos petrolíferos, Salyer [3] para la caracterización de parafinas y Oliver [16] con parafinas microencapsuladas.

### **DSC**

La Calorimetría diferencial de barrido (del inglés: Differential Scanning Calorimetry o DSC) es una técnica termoanalítica, en la que la diferencia de calor entre una muestra y una de referencia, es medida como una función de temperatura. Generalmente, el programa de temperatura para un análisis DSC es diseñado de tal modo que la temperatura del portador de la muestra aumenta linealmente en función del tiempo. La muestra de referencia debería tener una capacidad calorífica bien definida en el intervalo de temperaturas en que vaya a tener lugar el barrido.

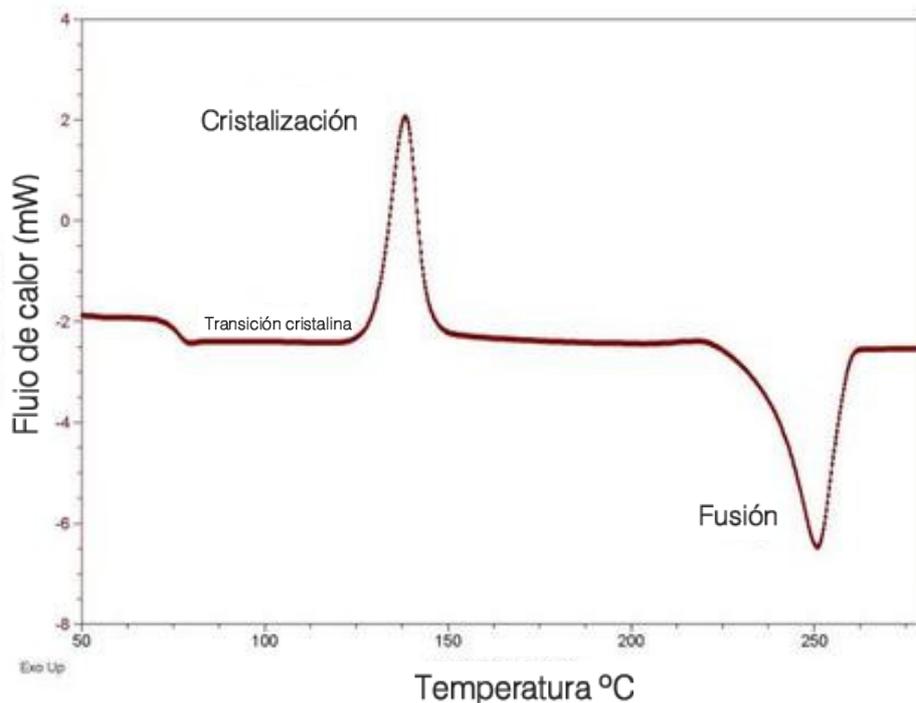
El principio básico subyacente a esta técnica es que, cuando la muestra de PCM experimenta el cambio de fase, se necesitará que fluya más (o menos) calor que la de referencia para mantener ambas a la misma temperatura, ya que el PCM estará gastando o cediendo el calor latente.

El que fluya más o menos calor a la muestra depende de si el proceso es exotérmico o endotérmico. Por ejemplo, en tanto que el PCM sólido funde a líquido se requerirá que fluya más calor a la muestra para aumentar su temperatura a la misma velocidad que la de referencia. Esto se debe a la absorción de calor de la muestra en tanto ésta experimenta el cambio de fase endotérmica desde sólido a líquido. Por el contrario, cuando el PCM experimenta procesos exotérmicos (tales como una solidificación) se requiere menos calor para alcanzar la temperatura de la muestra. Determinando la diferencia de flujo calorífico entre la muestra y la referencia, los calorímetros DSC son capaces de medir la cantidad de calor absorbido o eliminado durante tales transiciones.

#### 4 Análisis de la viabilidad de usar materiales con PCM en edificación

##### Curvas DSC

El resultado de un experimento DSC es una curva de flujo calorífico versus temperatura. Existen dos convenciones diferentes al representar los efectos térmicos: las reacciones exotérmicas que exhibe la muestra de PCM pueden ser mostradas como picos positivos o negativos dependiendo del tipo de tecnología o de instrumentación utilizadas en la realización del experimento. Los efectos sobre o bajo una curva DSC pueden ser utilizados para calcular entalpías de transiciones. Este cálculo se realiza integrando el pico correspondiente a una transición dada.



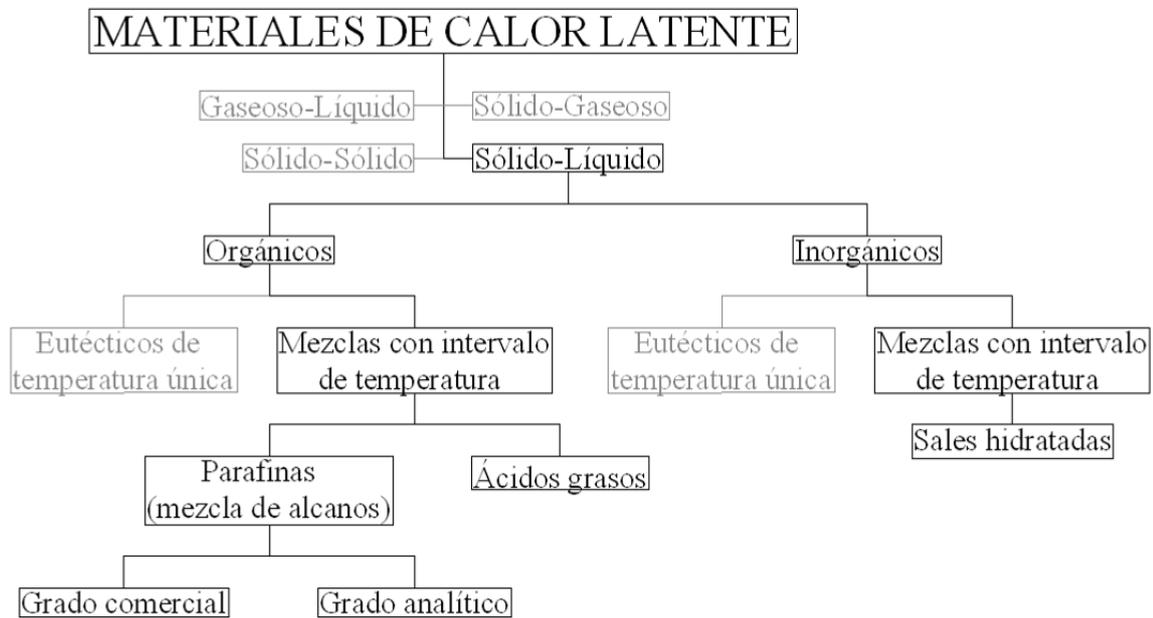
*Figura 3. Ejemplo de un DSC.*

##### DTA

Es una técnica alternativa, donde la magnitud que se quiere mantener constante no es la temperatura como en el DSC, sino el flujo calorífico que se comunica a la muestra del PCM y a la muestra de referencia. Por tanto, en esta técnica lo que es diferente es la temperatura que van a tener ambas muestras, en función del mismo flujo de calor suministrado. Esta técnica es menos utilizada que el DSC.

**1.3. Clasificación de los PCM.**

**1.3.1. Según su naturaleza.**



**Figura 4.** Clasificación de materiales con calor latente.

En el ANEXO I, se citan ejemplos de sustancias inorgánicas, sustancias orgánicas y mezclas no eutécticas de sustancias orgánicas y ácidos grasos.

A continuación se exponen ventajas e inconvenientes de sustancias orgánicas e inorgánicas.

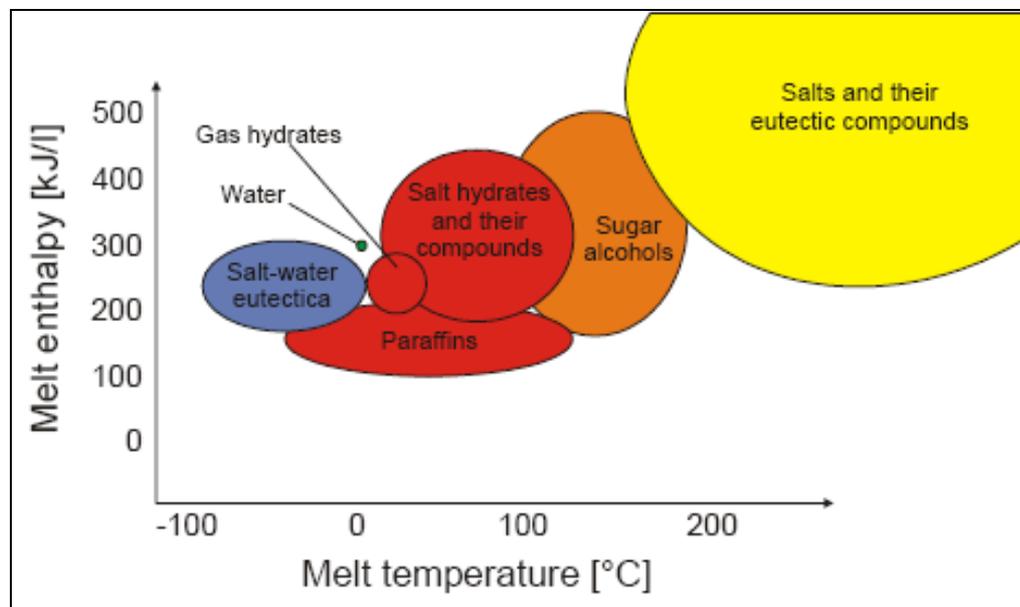
	ORGÁNICOS	INORGÁNICOS
VENTAJAS	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Muy fáciles de usar.</li> <li>-No corrosivo.</li> <li>-Bajo o ninguno <i>sub-enfriamiento</i>.</li> <li>-Estabilidad química y térmica.</li> <li>-Mayor rango de temperaturas de fusión.</li> <li>-Ecológicamente inocuos.</li> <li>-Más fácil de encapsular</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Mayor entalpía de fase de cambio.</li> <li>-Mayor conductividad térmica.</li> <li>-No inflaman.</li> <li>-Menor coste económico.</li> <li>-Menor cambio de volumen durante el cambio de fase.</li> <li>-Biodegradables.</li> </ul>

## 6 Análisis de la viabilidad de usar materiales con PCM en edificación

INCONVENIENTES		
	<ul style="list-style-type: none"><li>-Menor entalpía de fase de cambio.</li><li>-Menor conductividad térmica.</li><li>-Inflamabilidad.</li><li>-Mayor coste económico.</li><li>-Mayores cambios de volumen durante el cambio de fase.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>-Corrosión con metales.</li><li>-Sub-enfriamiento.</li><li>-Separación de fases.</li><li>-Segregación de fase, falta de estabilidad térmica. Necesitan aditivos.</li><li>-Bajas temperaturas de fusión.</li><li>-Más difíciles de encapsular.</li></ul>

**Tabla 1:** ventajas e inconvenientes entre sustancias orgánicas e inorgánicas.

### 1.3.2. Según el rango de fusión en el que actúan.



**Figura 5.** Relación temperatura de fusión y entalpía de fusión.

Como se observa en la figura 5, las mezclas eutécticas de sal son adecuadas para usarse en rangos de temperatura por debajo de 0 ° C.

Los hidratos de gas con gases disueltos en el agua bajo presión son adecuados cuando la temperatura oscila entre 0° C y 20° C y se encuentran en desarrollo. Las sales hidratadas y las parafinas se pueden utilizar en rangos mucho más amplio de temperatura, pasando los 100°C.

Para el uso en edificación con temperaturas dentro del rango de confort humano (menos de 21°C sensación de frío, y más de 26°C sensación de calor), los materiales PCM más adecuados y utilizados, son las parafinas.

## **1.4. Usos de materiales PCM.**

### **1.4.1. En edificación.**

Uno de los usos más importantes de este tipo de producto es la aplicación en los edificios, por su capacidad para suavizar las variaciones de temperatura, amortiguando la amplitud de la temperatura interior e incrementando el valor de la inercia térmica de los materiales, mejorando así el confort térmico en el interior de los edificios [4], [5], [15] y [16].

El uso de PCM para el almacenamiento térmico en los edificios es una de las primeras aplicaciones estudiadas, junto con los tanques de almacenamiento típicas. La aplicación de los primeros PCM es para la calefacción y la refrigeración en los edificios, por Telkes en 1975 [6]. En ese mismo año también se utilizó como componentes estructurales para el almacenamiento térmico, Barkmann y Wessling [7].

Las aplicaciones de acondicionamiento climático hay que dividir las en dos grupos principales: protección térmica o de la inercia, y almacenamiento. Una diferencia entre estos dos campos importantes de aplicación se refiere a la conductividad térmica de la sustancia. En algunos casos de protección térmica es conveniente tener valores bajos de conductividad, mientras que en sistemas de almacenamiento que tengan valores bajos, pueden tener un problema ya que esto conlleva a no hay suficiente energía almacenada.

A continuación se numeran aplicaciones de PCM en construcción:

-Como sistema de ahorro energético en refrigeración, ya que durante las horas de diurnas, la temperatura ambiente supera la temperatura de fusión, provocando así que el material absorba calor del ambiente para hacer el cambio de fase y refrigere la temperatura ambiente. Este sistema puede incrementar su efectividad si durante la noche, existe ventilación que favorezca la cesión de calor acumulado durante el día por el PCM.

-Como sistema de ahorro energético en calefacción, ya que durante las horas nocturnas o cuando ya no esté encendida la calefacción, el PCM cederá el calor que absorbió cuando la temperatura ambiente era superior a la de su cambio de fase.

-Como uso de ahorro de aire acondicionado, donde se recoge frío del ambiente durante la noche y se almacena, y su alivia al ambiente durante las horas más calurosas del día. Este concepto se conoce como free-cooling [6,7].

-Como refrigeración termoeléctrica, Omer [8,9], ha integrado un PCM en un diodo térmico para mejorar la eficiencia del disipador de calor.

## **8 Análisis de la viabilidad de usar materiales con PCM en edificación**

-Como disminuir la ganancia solar en los edificios. Ismail [8,9] estudió la posibilidad de usar una persiana de PCM para una ventana.

-Otros autores han escrito sobre el uso de PCM en los edificios, desde el punto de vista de la seguridad. Un artículo de Salyer [10], informes sobre la reacción al fuego y los posibles aditivos ignífugos (compuestos orgánicos de halógeno) que mejoran la respuesta al fuego de los materiales.

### **1.4.2 En sistemas de calefacción.**

Los materiales de cambio de fase que más se usan en sistemas de calefacción son: la Sal de Glauder, carbonato sódico, acetato de sodio y la cera de parafina. A pesar de que estos compuestos son bastante baratos, el embalaje y el procesamiento necesario para obtener un rendimiento aceptable de ellos es complicado y costoso. El material de embalaje debe ser lo suficientemente resistente para soportar los frecuentes cambios de volumen del material, resultado de los cambios de fase. También deben resistir la corrosión y las fugas. Los materiales de los envases más utilizados son el aluminio, acero y polietileno.

### **1.4.3 Almacenamiento térmico de energía solar**

En términos económicos comparando con el agua (el material comúnmente más utilizado como almacenamiento de energía solar), estos sistemas cuestan alrededor del doble que los sistemas de agua caliente. Pero tienen las ventajas asociadas de materiales como la parafina, tales como la estabilidad bajo la corrosión y los químicos. Además de la alta densidad de almacenamiento en pequeños cambios de temperatura.

### **1.4.4. Otros usos.**

-Integración en la ropa.

-Enfriamiento de cajas de transporte.

-Protección termal de comida: transporte, almacenaje, helados ... Espeau, Mondieig, Haget, Cuevas-Diarte. [11]

-Aplicaciones médicas: transporte de sangre, mesas de operaciones, terapias frío-calor. Cabeza, Roca, Nogués, Zalba [12]

-Enfriamiento de motores. Bellettre, Sartre, Biais, Lallemand. [13]

-Confort térmico en vehículos. Bluher. [14]

## **1.5. PCM en edificación.**

### **1.5.1 Material puro.**

#### **Parafinas de calor latente.**

Es el nombre común de un grupo de hidrocarburos alcanos. La molécula simple de la parafina proviene del metano. Las formas sólidas de parafina, son las ceras de parafina.



La capacidad calorífica específica de parafinas de calor latente es de 2,1 kJ/(kg × K). Su entalpía de fusión se encuentra entre 120 y 160 kJ/kg, lo cual es muy alto para los materiales orgánicos. La combinación de estos dos valores provoca una densidad de almacenamiento de energía excelente. En consecuencia, las parafinas de calor latente ofrecen de cuatro a cinco veces mayor capacidad de calor por volumen o masa, que el agua.

El almacenamiento de calor y la liberación lo llevan a cabo a temperaturas relativamente constantes. No tienen ningún efecto de sobreenfriamiento.

#### **Sales inorgánicas hidratadas.**

Son una composición de hidratos de sales y compuestos inorgánicos. Las sales hidratadas tienen una serie de hidratos y una forma anhidra que conduce a la estratificación de los materiales y la pérdida de recuperación de calor latente con el tiempo. Las sales hidratadas también tienen una tendencia de enfriamiento secundario.



Por esta razón se mejora su rendimiento con la adición de aditivos, con esto se logra realizar el cambio de fase a temperatura constante y el proceso se puede repetir a lo largo de muchos ciclos sin cambios en sus propiedades físicas o químicas. La sal que más se utiliza es el sulfato de sodio, se usará sulfato de sodio, aditivos y agua.

Tiene densidad de material de 1,0 kg/l o incluso más, por lo que es muy utilizado en la industria de la construcción, refrigeración pasiva y activa, en elementos de pared y aires acondicionados. Son materiales de baja inflamabilidad. Además, hay que tener en cuenta que el producto es higroscópico. Si se almacena en un recipiente no completamente independiente, el material puede absorber la humedad y podría modificar las propiedades.

## 10 Análisis de la viabilidad de usar materiales con PCM en edificación

A continuación se comparan propiedades entre parafinas y sales hidratadas inorgánicas.

	<b>PARAFINAS</b>	<b>SALES HIDRATADAS INORGÁNICAS</b>
<b>TÉRMICAS</b>		
<b>Fase de cambio de temperatura</b>	Las temperaturas de cambio de fase del producto son casi constantes a lo largo de su vida útil.	Para asegurar que no cambien estos valores en las sales hidratadas a lo largo de los ciclos, deben tener aditivos en su composición.
<b>Cambio de entalpía.</b>	Menor cantidad en el cambio de fase	Mayor cantidad en el cambio de fase.
<b>Conductividad térmica.</b>	Baja conductividad térmica. Aunque parezca desventaja, puede ser compensado por grandes áreas de calor de superficie de transferencia del material de almacenamiento de calor. Esto se consigue con los PCM encapsulados y ligados, donde se crea una mayor superficie	Debido a que tienen agua en su composición, tienen mejor conductividad térmica que las parafinas.
<b>Capacidad de almacenamiento de calor</b>	Debido a su composición especial, demuestran el resultado de una cristalinidad distintiva. Esto se traduce en una capacidad de almacenamiento de calor extraordinario, incluso en rangos pequeños de temperatura. Valores de capacidad de calor parecidos a las sales hidratadas.	Valores de capacidad de calor parecidos a las parafinas.
<b>Intervalo de fusión</b>	-20°C y 120°C	21°C y 31°C
<b>FÍSICAS</b>		
<b>Variación de la densidad</b>	Cada material cambia su densidad y por lo tanto su volumen cuando pasa a través de cambio de fase. Esto puede ser problemático en ciertas aplicaciones. En consecuencias, si se utiliza un recipiente cerrado, es necesario prever para la expansión de volumen de puro PCM, a fin de evitar el exceso de presión.	
<b>Volumen de expansión</b>	Mayor porcentaje del volumen de expansión. Hasta de 16%.	Menor porcentaje de volumen de expansión. Menores al 5%.
<b>Alta densidad</b>	Más densa en sólido que en líquido. Menos densa que las sales hidratadas.	Más densa en sólido que en líquido. Más densa que las parafinas.
<b>Sub-enfriamiento</b>	Muy bajo o nulo.	Limitación sobre el subenfriamiento. Necesita de aditivos para que empiece a solidificar la sustancia.

<b>QUÍMICAS</b>		
<b>Estabilidad</b>	<p>Son duraderas y estables a lo largo de los ciclos de cambio de fase. Esto se debe a que no hay ninguna reacción química durante el proceso de almacenamiento de energía térmica, ni del propio material, ni con el medio de transporte de calor, ni con los materiales de construcción utilizados en las aplicaciones. La solidificación y fusión son procesos puramente físicos, que es la razón por la cual la capacidad de almacenamiento de calor, se mantiene en un nivel alto durante toda la vida de trabajo de la unidad.</p>	<p>Necesitan aditivos. Material higroscópico. Son duraderas y estables a lo largo de los ciclos de cambio de fase, siempre que no cambie la humedad de su ambiente, ya que es un material higroscópico, y nunca deben estar en contacto con metales, ya que se producirá corrosión. En la fusión y solidificación, ya que son procesos físicos, no sufren ninguna desestabilización.</p>
<b>Franja de trabajabilidad</b>	<p>Para ambos materiales existe una franja de temperatura para su trabajabilidad. En las sales hidratadas es mucho menor.</p>	
<b>Inflamabilidad</b>	Son inflamables	No son inflamables
<b>Compatibilidad con los materiales de envasado</b>	<p>Las parafinas de calor latente son químicamente inertes a casi todos los materiales. Esta reactividad química tan baja es el origen del término “parafina”, derivado de la expresión latina “parum affinis”, que significa casi químicamente inerte.</p>	Corrosivos
<b>Toxicidad, contaminación, reciclabilidad.</b>	<p>Son ecológicamente inofensivas, no tienen efectos adversos sobre las plantas, animales o microorganismos. Se clasifican como sustancias no peligrosas para el agua (en caso de fusión superior a 27°C) y son 100% reciclables. Además, no son tóxicas ni peligrosas para la salud.</p>	<p>No tóxicos. Sin encapsulado, son amenaza para el agua. Clase de peligro 1 (WGK)</p>
<b>ECONÓMICAS</b>		
<b>Coste económico</b>	Más caras	Más baratas
<b>Durabilidad</b>	+ 10.000 ciclos	Necesitan aditivos.

**Tabla 2:** Comparación de propiedades entre parafinas y sales inorgánicas hidratadas.

### 1.5.2. Material micro-encapsulado.

La encapsulación de los PCM ha desarrollado interés por varios investigadores. Las ventajas y desventajas de las diferentes geometrías de la encapsulación de los PCM, los diferentes materiales utilizados y sus compatibilidades, han sido estudiadas por autores como Lane [15].

Los criterios más importantes sobre el principio de almacenamiento de calor latente son: la velocidad de reacción y sobre todo, la cercanía con la superficie donde debe trabajar el PCM. La mejor solución es incluir en el material de construcción un PCM que nos proporcione una enorme superficie en proporción al volumen y una alta capacidad de almacenamiento. En esto consiste un PCM micro-encapsulado.

#### Propiedades y ventajas:

-La envoltura es cerrada, por lo que el producto siempre se mantiene seco. El calor latente se encuentra en el núcleo de la micro-cápsula.

-El cambio de fase no es visible en el exterior, se produce dentro de cada microcápsula, con su correspondiente cambio de volumen. Por tanto, dentro de los materiales de construcción, provoca que estos siempre estén estables en términos de tamaño. Tienen volumen y espacio pequeño, pero con gran capacidad de almacenamiento.



-Rápido intercambio de calor por la alta relación S/V.  $1\text{ gr PCM} = 30\text{ m}^2$  de superficie.

-Puede ser integrado directamente en el material de construcción, es decir, se puede utilizar sin los procesos de trabajo adicional o mayor complejidad en la obra

-Mecánicamente, prácticamente indestructible, aguanta ciclos de alta resistencia.

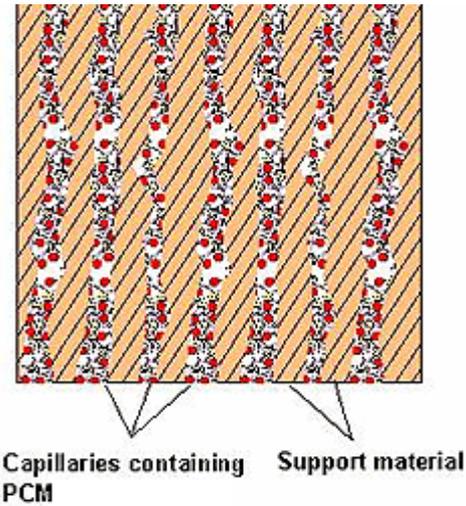
-Sub-enfriamiento nulo.

-Con el procesamiento correcto, no hay peligro de daños a las envolturas de tamaño microscópico. Contrariamente a los materiales macro-encapsulados, sobrevive el tratamiento mecánico de los materiales de construcción (por ejemplo, perforación, corte, etc) completamente sin daños.

**1.5.3. Material PCM consolidado a otro.**

En muchas aplicaciones, por temas de comodidad o especialización del personal que trabaja en la construcción, las casas comerciales han desarrollado una gama de PCM consolidado a otro.

El material PCM (normalmente parafina de calor latente), se incorporan dentro de una estructura secundaria de apoyo, como sílice, compuestos orgánicos, fibra... Este se define por el uso particular, y proporciona una matriz en la que el PCM se distribuye homogéneamente. En ocasiones, dependiendo del material “estructura” utilizado, serán necesarios los aditivos.



Cuando el PCM alcanza su temperatura de fusión, comienza a transformarse en un líquido dentro de la estructura de apoyo. La influencia combinada de las fuerzas capilares del material de apoyo y los aditivos especiales del cross-linking asegura que el PCM, aun cuando en la fase líquida, no se escape de la estructura. Esto significa que siempre se trabaja con material “seco”. Los espacios libres dentro del material consolidado, permiten la expansión del volumen del PCM que tendrá lugar dentro de la estructura y no será evidente. Por lo tanto, se mantiene su forma sólida macroscópica durante los procesos de cambio de fase.

**Propiedades y ventajas:**

-Al ser un material granulado, permite el llenado de los contenedores (o fundas textiles) de cualquier geometría.

-Mantiene su forma macroscópica sólida durante el cambio de fase. El PCM está ligado en la estructura secundaria del soporte, por lo que en forma líquida, no se escapa del granulado. El resultado del producto exteriormente es siempre seco y el manejo de líquidos se elimina.



-La forma del material de almacenamiento de calor latente proporciona la gran superficie necesaria para la transferencia de calor. Se puede obtener en diferentes tamaños de granulado.

-Cuando el granulado es material orgánico poroso, es ecológicamente inofensivo, sin efectos adversos sobre las plantas, animales o microorganismos, no tóxico. 100% reciclable.

## 14 Análisis de la viabilidad de usar materiales con PCM en edificación

- Químicamente inerte.
- Alta capacidad de almacenamiento de energía térmica. El almacenamiento de calor y la liberación se llevará a cabo a temperatura relativamente constante.
- Sin expansión de volumen durante el cambio de fase.
- Ningún efecto sobreenfriamiento.
- Larga vida del producto, con un rendimiento estable a través de los ciclos de cambio de fase.
- Intervalo de fusión entre aproximadamente -4 a 80°C.

### **1.5.4. Productos de construcción que incluyen PCM en su composición.**

#### **Mezcla de yeso y PCM:**

Es una mezcla de yeso con material PCM. Está completamente formulado para ser usado directamente en obra como mortero seco. Se puede utilizar para hacer acabados en cualquier superficie mediante proyectado o aplicado manualmente.

A través de la variación del espesor de la capa, la cantidad de PCM que almacena calor latente puede estar controlada según las necesidades.



**Foto 1:** Material proyectado



**Foto 2:** Material aplicado manualmente.

Otras aplicaciones que se le pueden otorgar al material son, como fabricación de baldosas para crear un acabado de superficie discontinuo, y para envolvente de tubos capilares en sistemas de refrigeración por agua.



**Foto 3:** Baldosa realizada con el material

**Foto 4:** Envoltente de tubos en refrigeración

**Derivados de la tecnología sándwich:**

Es un panel sándwich con superficies de metal y núcleo de espuma rígida de poliuretano.

Se han desarrollado paneles térmicos de alta eficiencia para techos con PCM. El modo es que los tubos de refrigeración por agua a modo de esteras de tubos capilares, se sitúan en el reverso de la capa de PCM que da a la habitación. Esta solución hace que el sistema de refrigeración sea renovable y amortigua los picos de carga.



**Bloques de hormigón.**

Son bloques de hormigón celular que ofrecen buenas resistencias frente el fuego, capacidad de almacenamiento de calor latente, positivas características de insonorización y ambientales. La migración del frente de calor a través de la pared exterior está frenada por el componente activo del PCM. El resultado es una piedra altamente aislante que muestra pequeñas fluctuaciones de temperatura en la superficie de la pared interior de la U del mismo valor. Esto conduce a temperaturas interiores más constante.



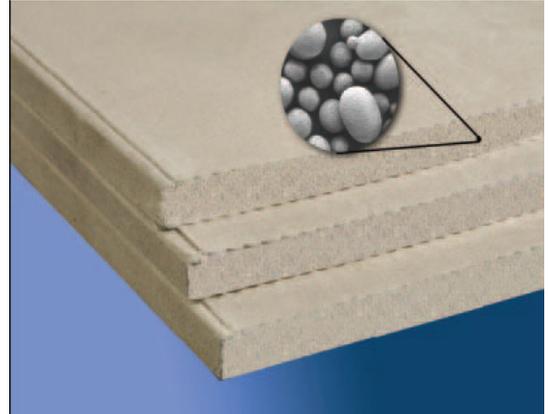
**Placas de yeso con PCM incorporado.**

Son paneles de yeso que pueden ser integrados en la construcción de manera rápida y fácil con los conceptos innovadores de construcción en seco. Las ventajas son las siguientes:

-Es muy fácil de usar, no tiene diferencia con la construcción convencional o estructural.

-Optimiza la tecnología de encapsulación para su incorporación en edificios.

-Reduce el consumo convencional de energía del aire acondicionado, por lo que mejora el valor del edificio.



## **2. Ensayos en laboratorio de PCM y de materiales que los incorporan.**

Esta parte del proyecto se dedica al estudio de propiedades de los materiales PCM y a materiales de construcción que los incorporan en su composición, mediante la realización de ensayos.

### **Características de los PCM escogidos para realizar los ensayos en el laboratorio.**

Tras estudiar los diferentes tipos y maneras de comercializarse los PCM en el mercado, se han escogido tres tipos de materiales: dos de ellos son parafinas micro-encapsuladas en un material polimérico y el tercero consiste en parafinas consolidadas en una estructura secundaria de partículas minerales naturales porosas. (Ver ventajas e inconvenientes del uso de parafinas en Apartado 1.5, Tabla 2).

En este proyecto se trabaja se incorporan los PCM en materiales de construcción, por este motivo no se eligen materiales puros, que al producir el cambio de estado conlleven “derretirse” y un visible cambio de volumen. Este problema se ve resuelto al utilizar micro-cápsulas o al consolidarse a otro material, los cambios se producen dentro, y macroscópicamente el material está seco y no existen cambios de volumen. Esto también facilita su directa integración con los materiales de construcción. Al ser de forma granulada, se puede utilizar sin los procesos de trabajo adicional o mayor complejidad en la obra.

A continuación se especifican las características de los tres tipos de materiales PCM:

**DS 5001X, DS 5008X:** son PCM con diferentes propiedades térmicas, pero las mismas propiedades físicas: ambos son parafinas de calor latente micro-encapsuladas en un polímero.

Debido a su superficie esférica se produce el intercambio de calor a través de la alta relación superficie / volumen. Aproximadamente  $1\text{gr} = 30\text{ m}^2$  de superficie. En el núcleo de la micro-cápsula (tamaño aproximado de 5 milésimas), es donde se contiene el calor latente de almacenamiento gracias a la mezcla de cera especial, que absorbe la energía excedente de calor una vez que la temperatura se eleva por encima del umbral de temperatura definido. Esta energía térmica se almacena en la cera líquida y se libera de nuevo cuando la temperatura cae por debajo del umbral de temperatura.

Su envoltorio, como es un polímero, es prácticamente indestructible mecánicamente.

Se han escogido estos dos materiales porque en ambos casos sus temperaturas de cambio de fase se encuentran dentro del rango de confort humano y este motivo los hace idóneos para su aplicación en el interior de edificios.

## 18 Análisis de la viabilidad de usar materiales con PCM en edificación

**GR42 (1-3 mm):** este material es granulado, y el almacenamiento de calor del material que tiene el cambio de fase (parafina), está contenido dentro de una estructura de soporte secundario, en partículas minerales naturales porosas. Al fundir tampoco sale del núcleo.

Este material es menos eficaz, ya que al encontrarse el PCM ligado a un gránulo, la cantidad de parafina es menor. Sin embargo, es más ecológico, por no tener la presencia del polímero.

Se ha escogido este material por tener la temperatura de fusión mayor que el rango de confort humano, pero fácilmente alcanzables en materiales de construcción que están expuestos a radiaciones solares. Por tanto sus aplicaciones se dirigen a este tipo de materiales en un edificio.

Tabla resumen de las propiedades de los tres materiales PCM.

	DS 5001X	DS 5008X	GR42 (1-3mm)
<b>Composición de la parafina</b>	Mezcla eutéctica de derivados de hidrocarburos saturados (hidrocarburo parafínico o parafina, $C_nH_{2n+2}$ ) e insaturados, con aditivos anticorrosivos, preservativos y colorantes.		
<b>Clasificación</b>	Parafina micro-encapsulada en polímero		Parafina en soporte silícico
<b>Temperatura del cambio de fase (°C)</b>	26	23	41
<b>Calor latente ligado al cambio de fase</b>	110	100	45
<b>Capacidad de almacenamiento térmico de todo el intervalo de cambio de fase</b>	145	135	57
<b>Densidad (kg/m<sup>3</sup>)</b>	980	980	800
<b>Toxicidad y peligrosidad</b>	Ningún riesgo en la inhalación Muy bajo riesgo en la ingestión Irritación cutánea tras un largo contacto		

*Tabla 3:* Propiedades de los tipos de PCM utilizados en el proyecto.

### 2.1 Descripción de procedimientos e instrumentos utilizados.

Para el estudio de los materiales PCM y de materiales de construcción que los tienen incorporados en su composición, se han realizados varios ensayos.

En el ANEXO III se detallan los ensayos menos conocidos, ya que se considera innecesario explicarlos todos. Estos ensayos son: observación con el microscopio electrónico y rotura de probetas prismáticas a esfuerzos mecánicos.

## **2.2 Ensayos realizados a los materiales PCM**

### **2.2.1. Observación del material PCM con microscopio óptico.**

Se ha utilizado un microscopio digital con diez aumentos. Con estas observaciones se pretende analizar es si al aumentar la temperatura de los materiales PCM, aparece alguna variación de sus propiedades o estructura.

Para ello, se calientan las muestras y se observan con el microscopio. Sólo se va a realizar para el PCM GR42 (1-3mm), ya que por el tamaño de las micro-cápsulas en los casos de PCM DS 5001X y DS 5008X, no se va a observar nada con este número de aumentos.

El PCM GR42 es un gránulo de material mineral poroso que contiene en su interior la parafina. En las especificaciones del producto, no se detallan exactamente de qué manera contiene el material mineral a la parafina en su interior. Por lo que además de observar el material en condiciones normales, se decide machacar una parte, y analizar si al calentarlo y fundir la parafina, esta sale del gránulo.

Para ello se realizan tres tipos de muestras: material tal cual viene embalado, machacado y pasado por el tamiz de 1mm; y machacado y pasado por el tamiz de 0,5mm. Cada una de ellas se observa en tres momentos diferentes: sin calentar, calentada y observada en caliente; y calentada y observada en frío. Los resultados se muestran en la figura 7.



**Fig.6:** Los tres tipos de muestras de GR42 que se utilizan en el ensayo.

## 20 Análisis de la viabilidad de usar materiales con PCM en edificación

**MUESTRA: SIN MACHACAR**

**PRODUCTO: Sin calentar**



**PRODUCTO: En caliente**

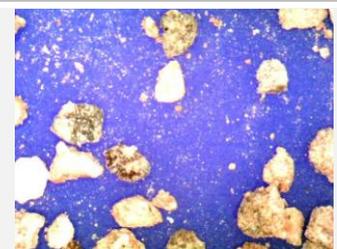


**PRODUCTO: Calentado, pero ya en frío**



**MUESTRA: TAMIZ 1mm**

**PRODUCTO: Sin calentar**

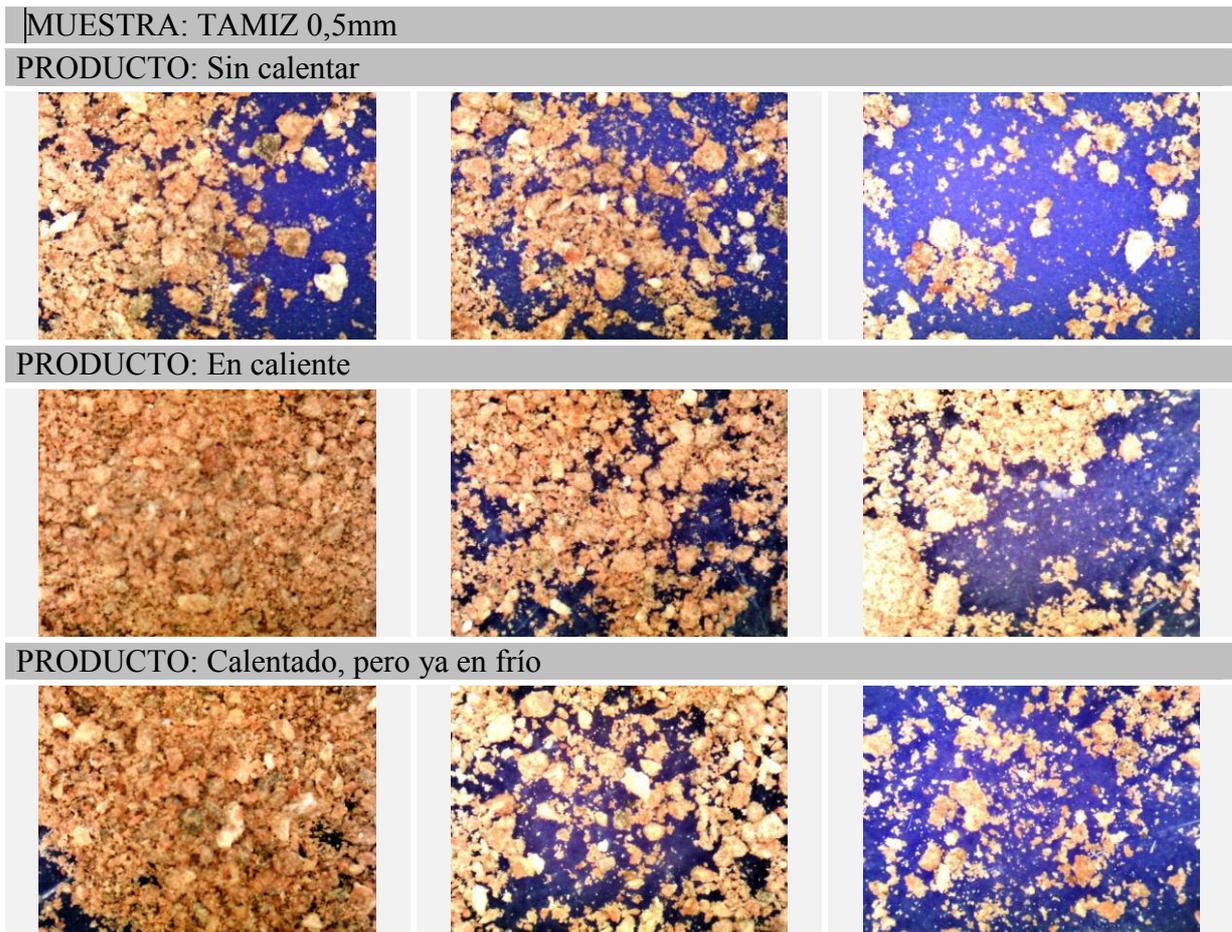


**PRODUCTO: En caliente**



**PRODUCTO: Calentado, pero ya en frío**





**Fig.7:** Observación con la lupa de diez aumentos de las diferentes muestras realizadas con PCM GR42 (1-3mm)

De la muestra del producto sin machacar, no se observa que al calentarla, aparezca alguna diferencia en su apariencia. Se esperaba este resultado, por que la parafina que ha fundido, se encuentra en el interior del gránulo.

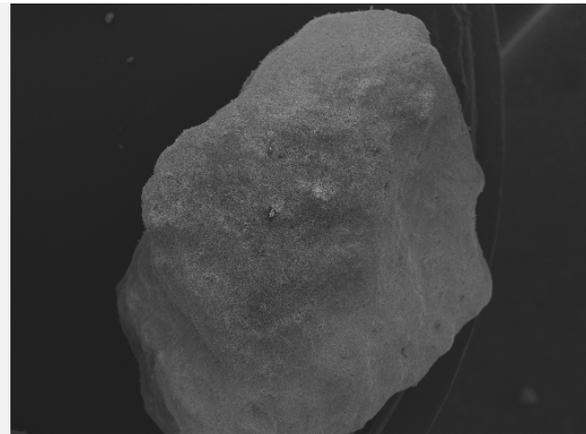
De las muestras que se han machacado y pasado por los dos tamices, se esperaba que al calentarlas se observara la parafina fundida. Pero con la lupa de diez aumentos no se aprecian diferencias dentro de las muestras machacadas, las que han sido calentadas de las que no. Se observará con el microscopio electrónico.

### **2.2.2 Observación con el microscopio electrónico.**

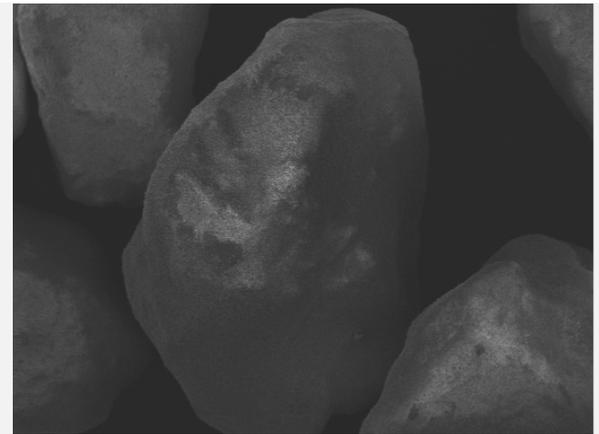
Para observar la composición a nivel microscópico de los materiales PCM utilizados en el laboratorio, se ha utilizado un microscopio electrónico de los Servicios Científicos Técnicos de la Universidad de Barcelona. El método de trabajo del microscopio se explica en el ANEXO III.

**GR42 normal y GR42 calentado a 60°C**

Como se ha comentado en el punto anterior, se quiere analizar si se produce un cambio físico en el material cuando este ha sufrido un cambio de fase y por lo tanto la parafina ha fundido. Por este motivo, se observan y comparan, una muestra de GR42 directamente obtenida del embalaje y otra de GR42 que fue calentada hasta los 60°C, y ahora se observa en frío. Estas muestras son de producto sin machacar.

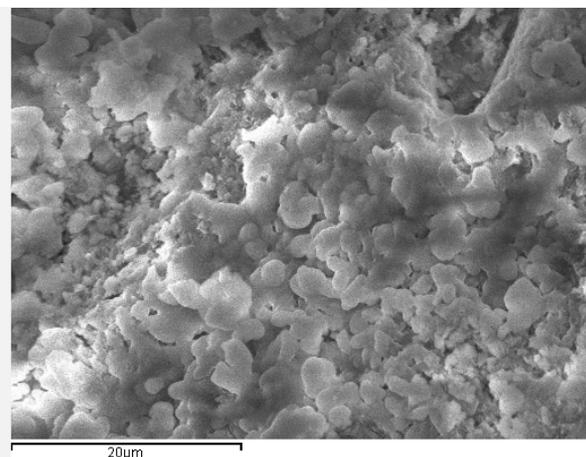


**Foto 5:** Gránulo GR42 sin calentar

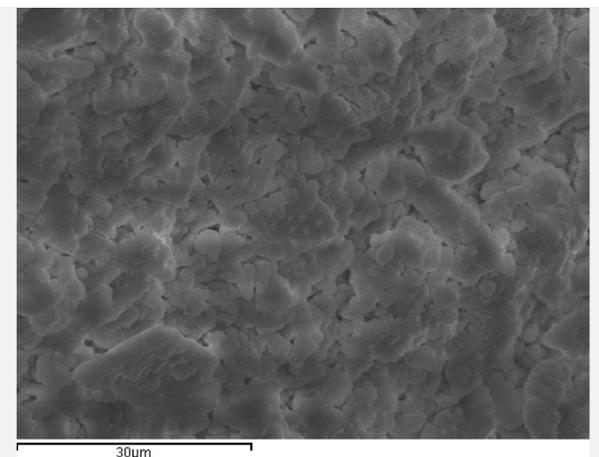


**Foto 6:** Gránulo GR42 calentado hasta 60°C

En estas fotografías se observa gránulos del PCM GR42. Se ve que presenta forma irregular y textura porosa, pero de momento no se detecta ninguna diferencia entre ambas muestras.



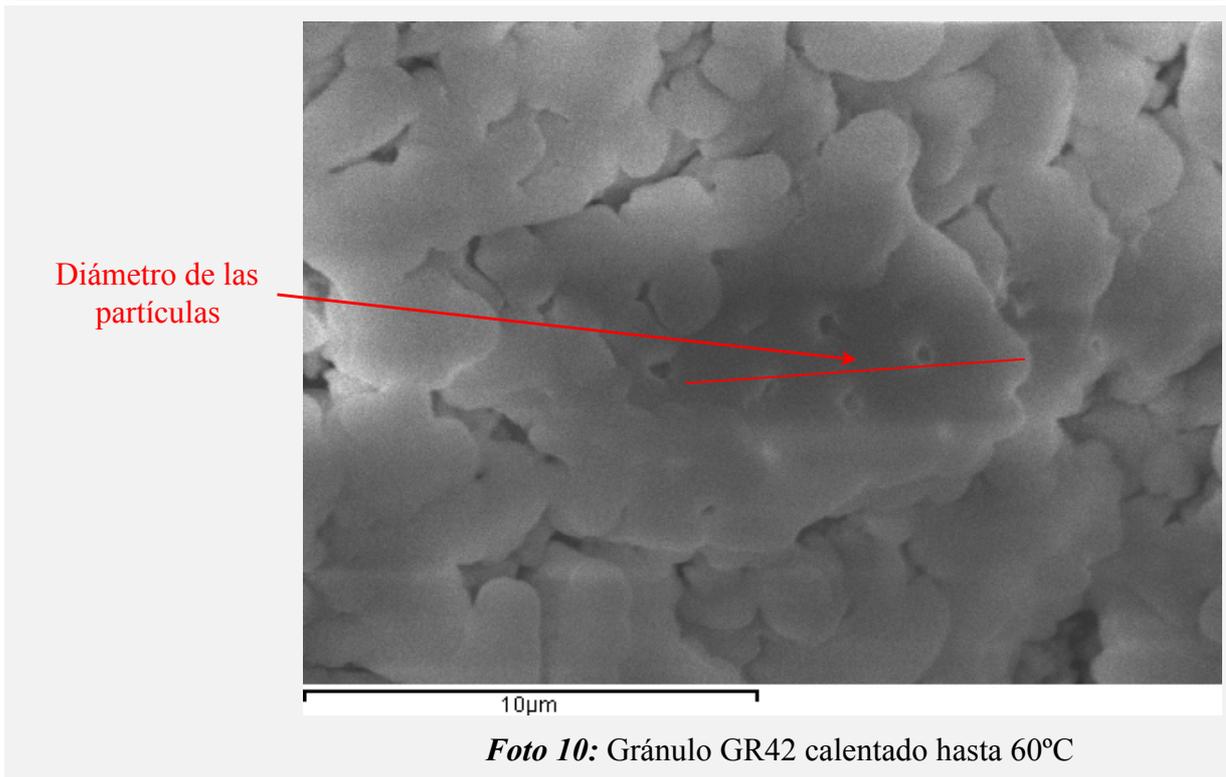
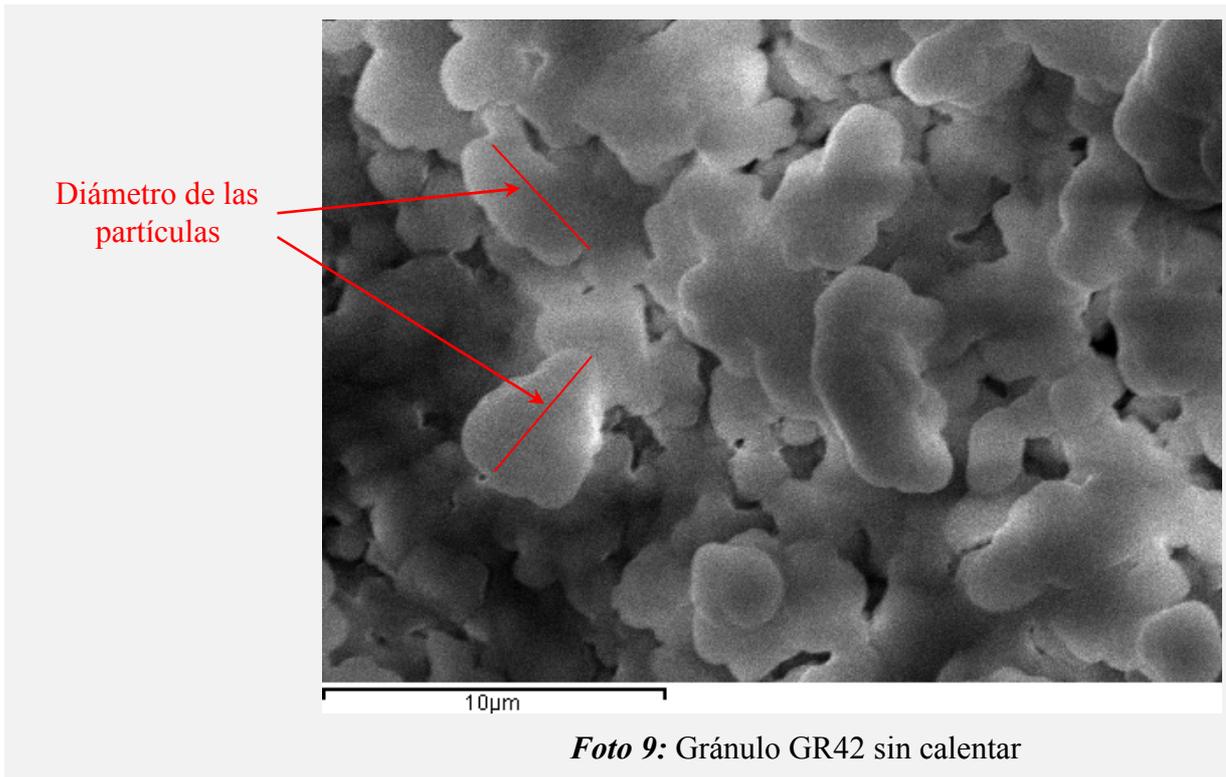
**Foto 7:** Gránulo GR42 sin calentar



**Foto 8:** Gránulo GR42 calentado hasta 60°C

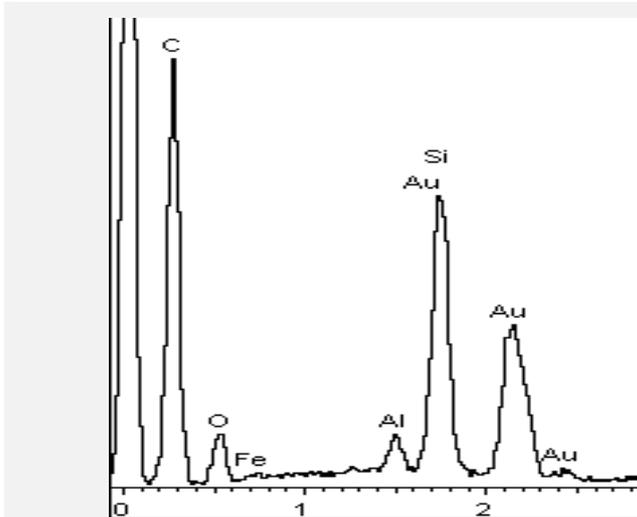
Comparando las fotografías 3 y 4, se puede observar como el tamaño de las partículas que el forma el gránulo de GR42 en el caso de la muestra que ha sufrido un ciclo de cambio de fase, las partículas son de mayor tamaño.

A continuación se amplían estas áreas, para analizarlas mejor.

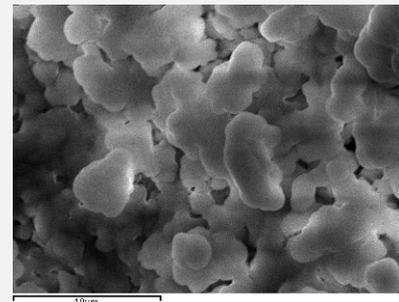


Se observa claramente como son mayores en el caso de la muestra de GR42 que ha sido calentada. Esto es debido a que la parafina una vez que funde y pasa a estado líquido, hace que mezclan unas con otras, creando partículas de mayor tamaño.

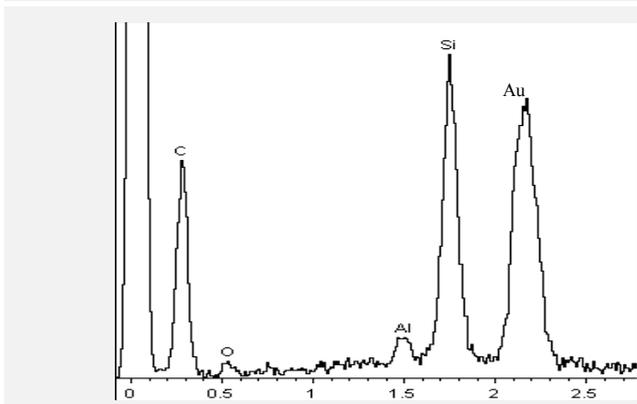
A continuación se muestran los microanálisis realizados a las áreas de las fotografías anteriores, para analizar que elementos hay presentes en ella. La presencia de Oro (Au), es debido a que se recubren las muestras con una fina capa, para garantizar la conductividad. Su presencia no influye en la imagen.



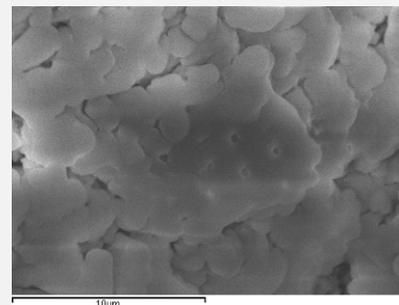
**Fig.8:** Microanálisis de área



Área del gránulo de GR42.



**Fig.9:** Microanálisis de área

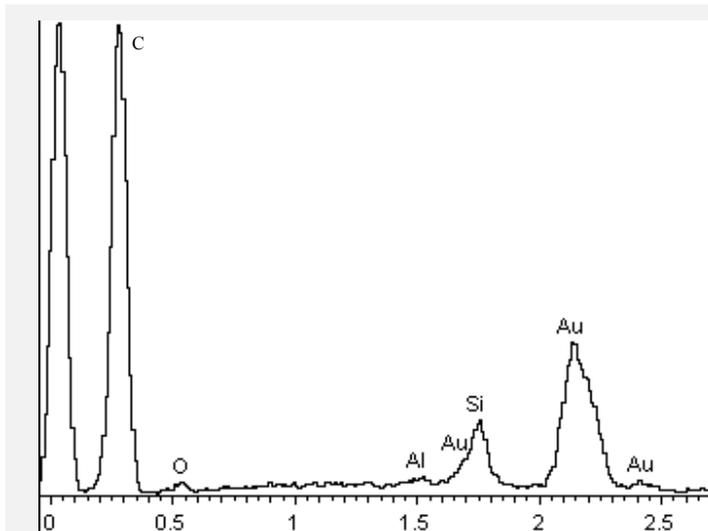


Área del gránulo de GR42 calentado.

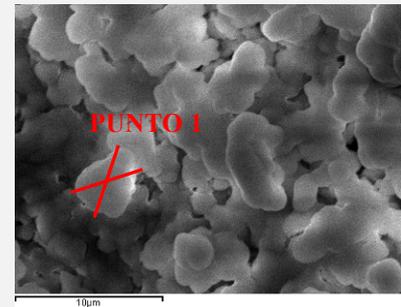
Tras los microanálisis de área, se confirma que es una zona del gránulo con presencia de parafinas. La cantidad de Sílice, es debido al material mineral del gránulo, y el Carbono, es producto de la parafina, ya que esta es un hidrocarburo.

Se observa como del microanálisis de una zona a otra, los porcentajes de presencia de elementos varían. Esto se explica, porque la parafina no esta repartida de manera homogénea. Y es que, sin salir del gránulo, no tiene nada que la contenga.

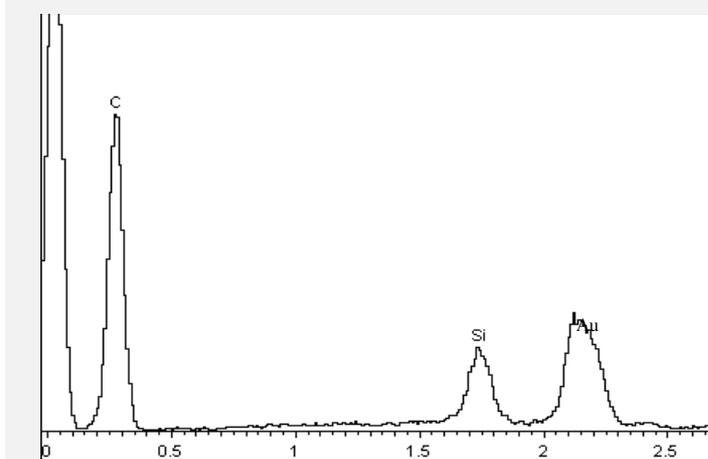
Para comprobar que las partículas que anteriormente se comparaban de tamaño son parafinas, se realizan microanálisis de esos puntos.



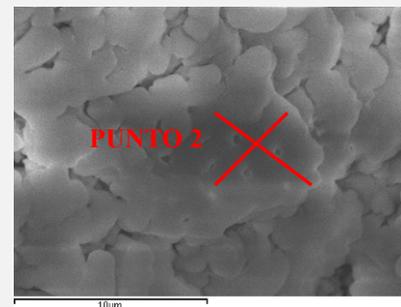
**Fig.10:** Microanálisis del punto 1



Punto del gránulo de GR42.



**Fig.11:** Microanálisis del punto 2



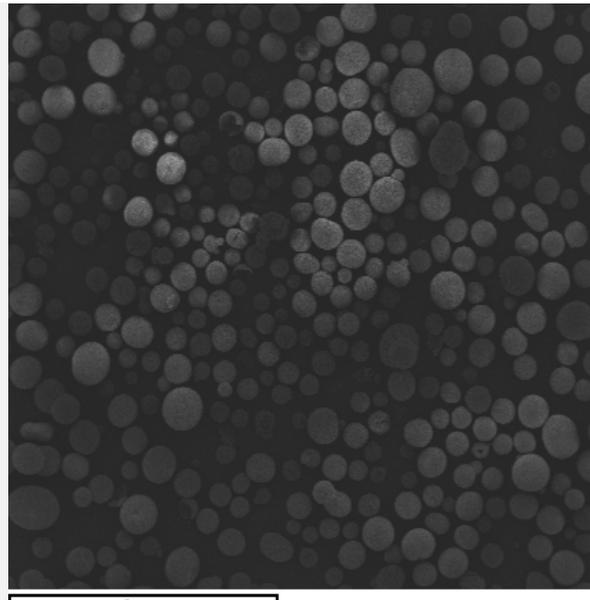
Punto del gránulo de GR42 calentado.

Para los dos casos, se confirma que son partículas de parafina, debido a la gran cantidad de Carbono que aparece.

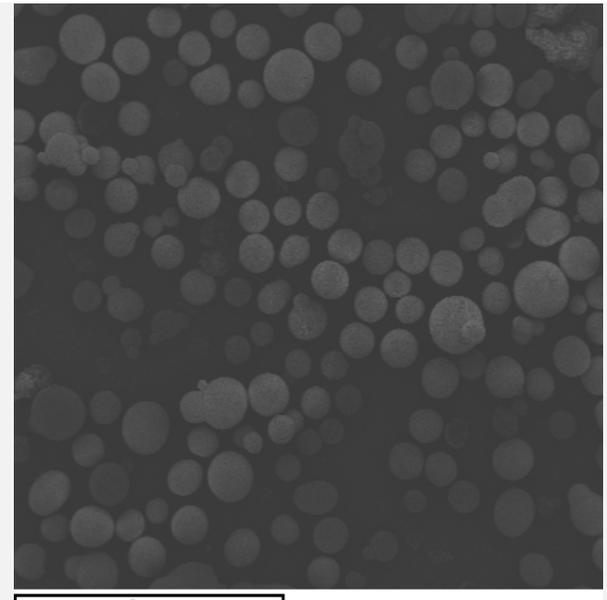
En el caso del punto dos (GR42 calentado), existe mayor cantidad de Sílice. Creemos que al solidificar varias partículas de parafina creando esta de mayor tamaño, se puede haber incluido en su composición finos del material del gránulo.

### **DS 5001X y DS 5008X**

Se prepararon muestras del material PCM DS 5001X y del PCM DS 5008X, y se miraron en el microscopio de manera separada. Tras analizar las fotos obtenidas, se observa que aunque ambos materiales tienen propiedades térmicas diferentes, en lo que se refiere a las físicas, son iguales. Por este motivo, las observaciones se exponen de manera conjunta.

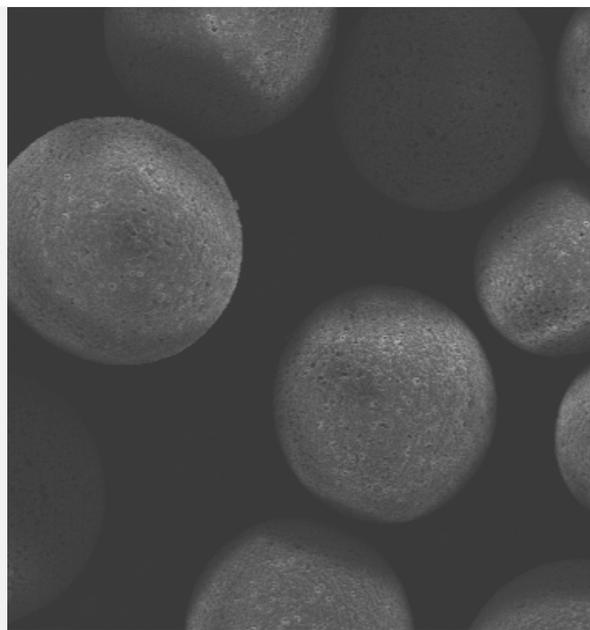


**Foto 11:** Material DS 5001X

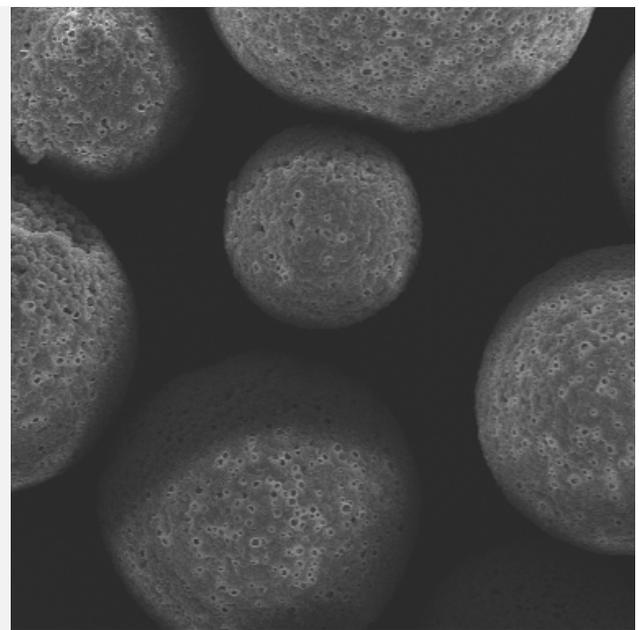


**Foto 12:** Material DS 5008X

En las fotografías 7 y 8, se aprecia poco más de lo que percibimos al mirar el producto cuando lo sacamos de su embalaje. Se ven las esferas de diferentes tamaños, desde 80 hasta 180 micras de diámetro.

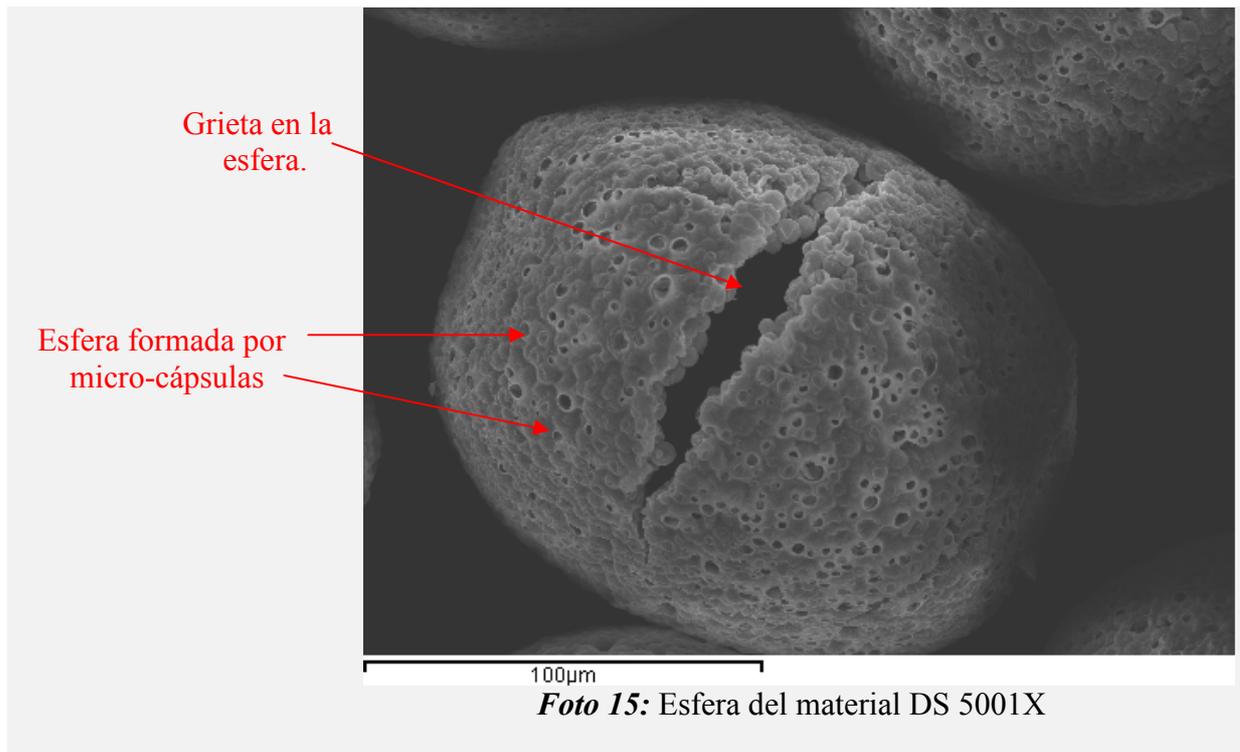


**Foto 13:** Material DS 5008X



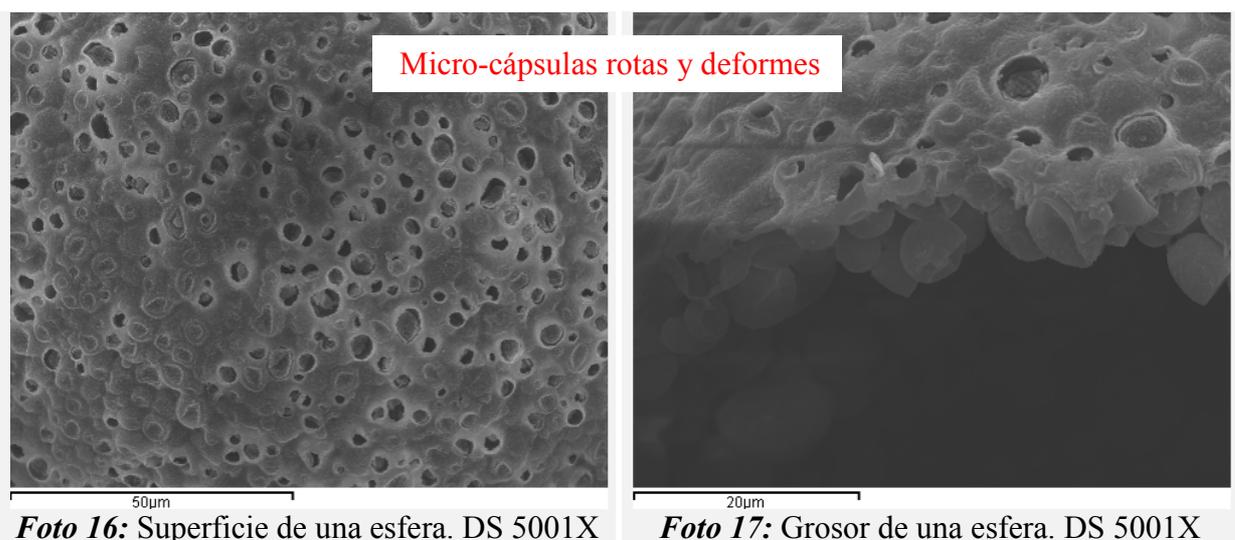
**Foto 14:** Material DS 5001X

En la fotografía 14, se aprecia que la superficie de la esfera presenta mucho poros. Además existen esferas deformes y con grietas. Se aumenta la fotografía para analizar una esfera.



En esta fotografía se puede observar que la esfera está formada de micro-cápsulas de diámetro aproximado desde 3 hasta 6 micras, que son las que contienen el material que llevan a cabo el cambio de fase, en su interior. Pensamos que esto es debido a su proceso de fabricación, ya que con este formato, se eliminan los posibles riesgos de inhalación de partículas de tamaño tan pequeño como son las micro-cápsulas.

#### Estado de las micro-cápsulas

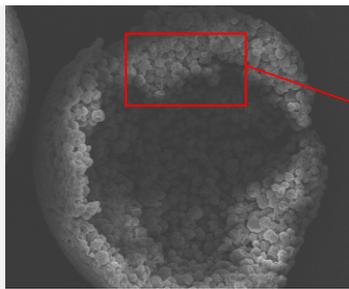


En el momento de realizar estas fotografías con el microscopio electrónico, la temperatura ambiente del laboratorio era alrededor de los 20°C. Esta temperatura se encuentra cerca del

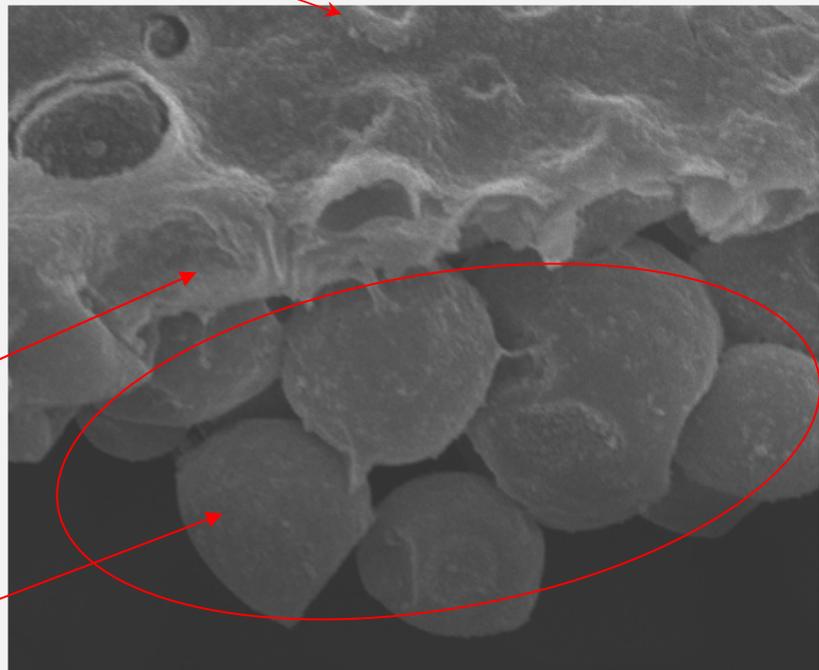
intervalo de cambio de fase de ambos materiales. Este es el motivo de que existan micro-cápsulas deformadas, ya que parte del material que contienen en su interior esta fundiendo y el polímero que las rodea al ser flexible, adquiere su forma.

El hecho que se aprecien micro-cápsulas rotas, se debe a que al producir el vacío que necesitan las muestras para poder ser observadas en el microscopio, se rompe el polímero que las encapsula.

#### Unión de las micro-cápsulas



**Foto 18:** Esfera rota por la mitad. DS 5008X



Micro-cápsulas  
ligadas

Micro-cápsulas  
seltas

**Foto 19:** Composición de la esfera. DS 5008X

En estas fotografías se puede observar que las esferas son huecas y que las micro-cápsulas se agrupan sólo en la parte más exterior de las esferas que forman. Además, están unidas por un material ligante en la cara exterior, mientras que en la cara interior, las micro-cápsulas no tienen este material que las liga entre ellas y están sueltas.

En los siguientes microanálisis se confirma la presencia de Silicio en la parte exterior de la esfera, que no corresponde ni a la parafina ni al polímero que la encapsula. Creemos que puede ser del ligante de las micro-cápsulas, que este esté formado por grupos Silanos.

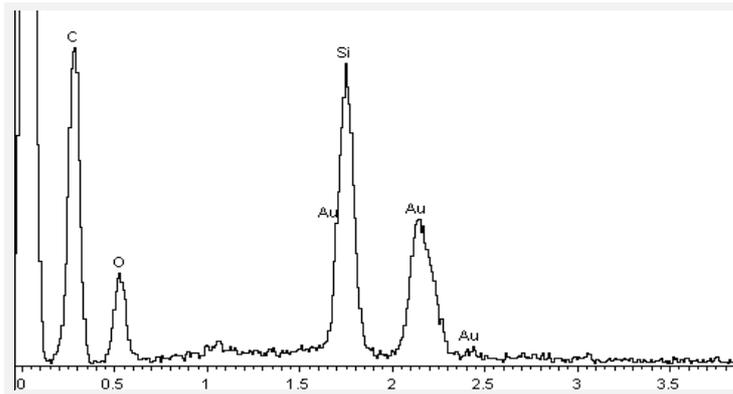
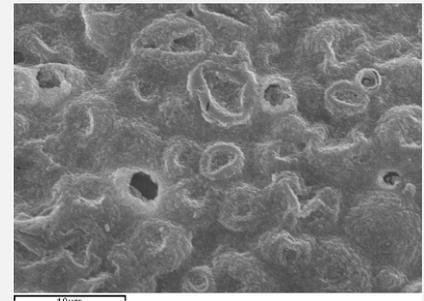


Fig.12: Microanálisis de área de la superficie de la esfera.



Área exterior de la esfera.  
DS 5008X.

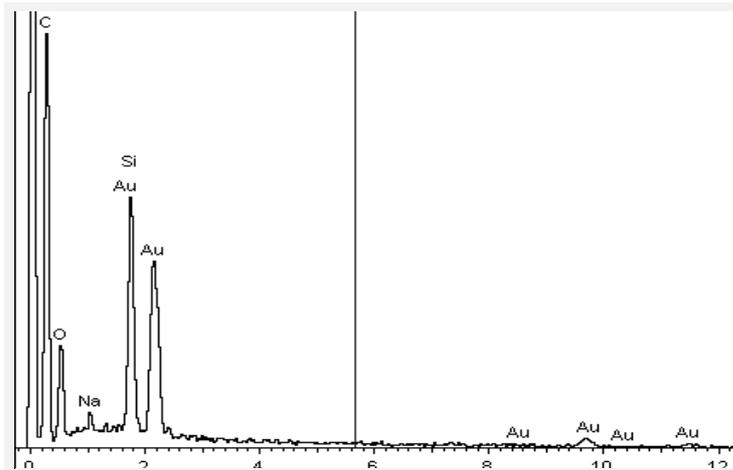
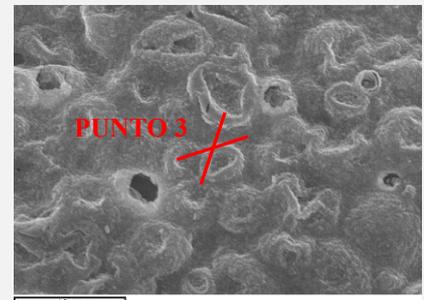


Fig.13: Microanálisis del punto 3



Punto exterior de la esfera.  
DS 5008X.

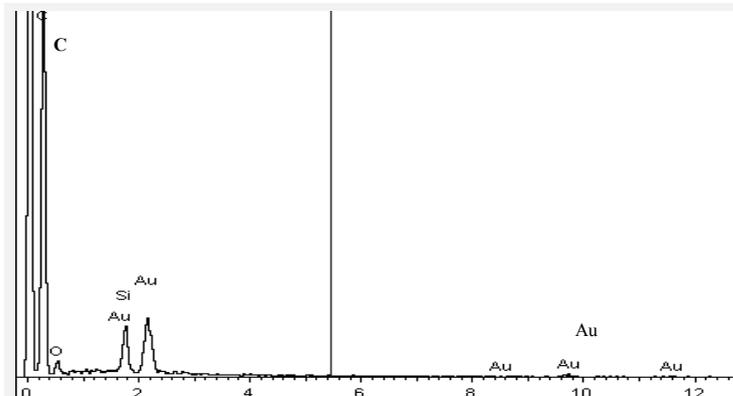
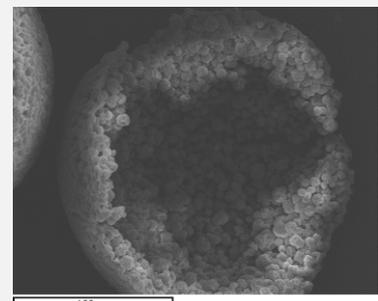


Fig.14: Microanálisis de área del interior de la esfera.



Área interior de la esfera.  
DS 5008X.

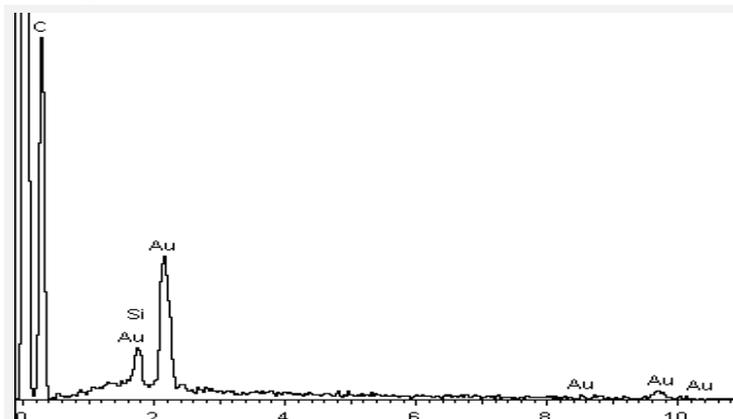
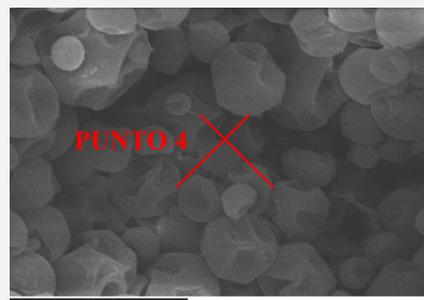


Fig.15: Microanálisis del punto 4



Punto interior de la esfera.  
DS 5008X.

**2.2.3 Datos obtenidos del DSC.**

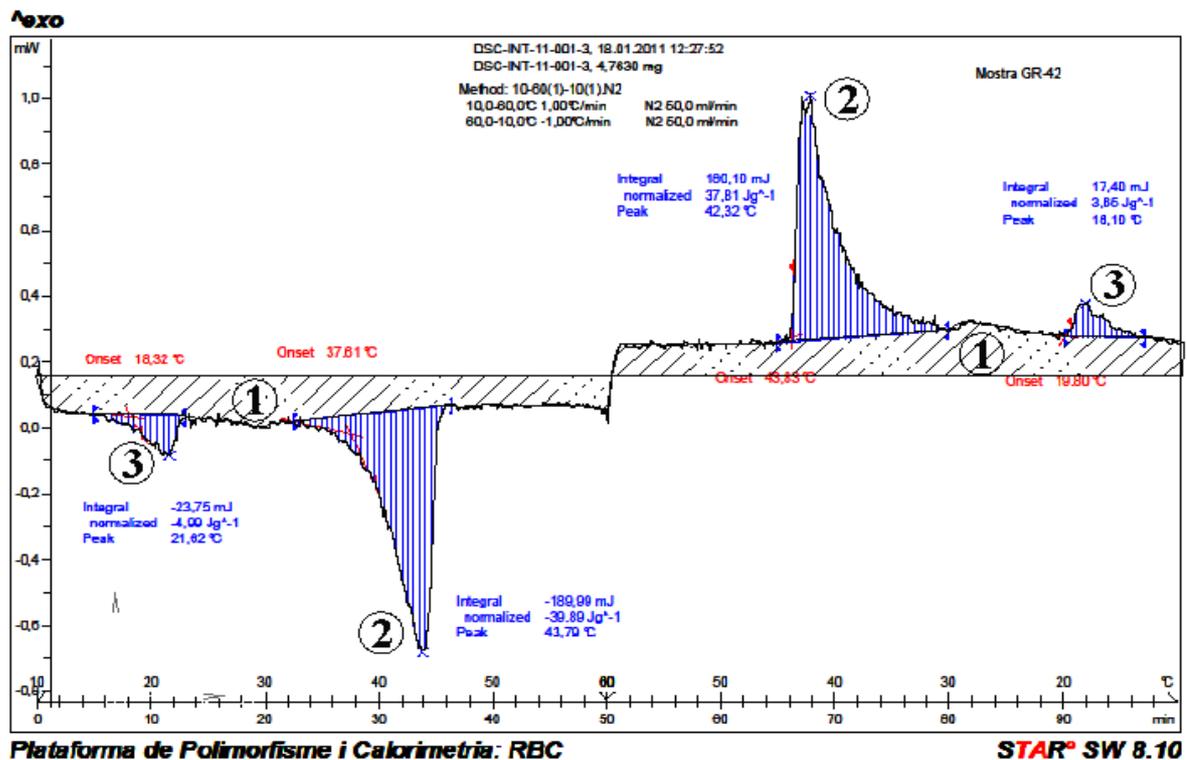
Este punto se destina al análisis de la capacidad de almacenamiento de calor total asociado al proceso de cambio de fase, de cada material PCM. Para ello se utiliza el método DSC, descrito en el apartado 1.2.

En este ensayo, se utilizan pequeñas muestras de los tres materiales PCM analizados en el laboratorio. Las muestras se calientan con una variación de temperatura de 1°C/min. Aunque esta velocidad no corresponde con una situación ambiental, lo que se pretende obtener son los cambios endotérmicos y exotérmicos, que sufre la muestra con la variación de la temperatura.

De los resultados del DSC se obtienen dos partes en la curva, una es el calentamiento y otra el enfriamiento. No son simétricas, pero en ambos procesos para la misma muestra, se diferencian partes iguales: uno o varios picos que representan el calor latente intercambiado con el medio (absorbido o cedido), resultado del cambio de fase del material y otra parte casi constante, que es su capacidad de almacenamiento de calor sensible.

**Curvas DSC.**

La figura 14 corresponde al material GR42 (1-3mm). La muestra, de 4,76 mg de masa, se calienta de 0 a 60°C y se enfría de 60 a 0°C.

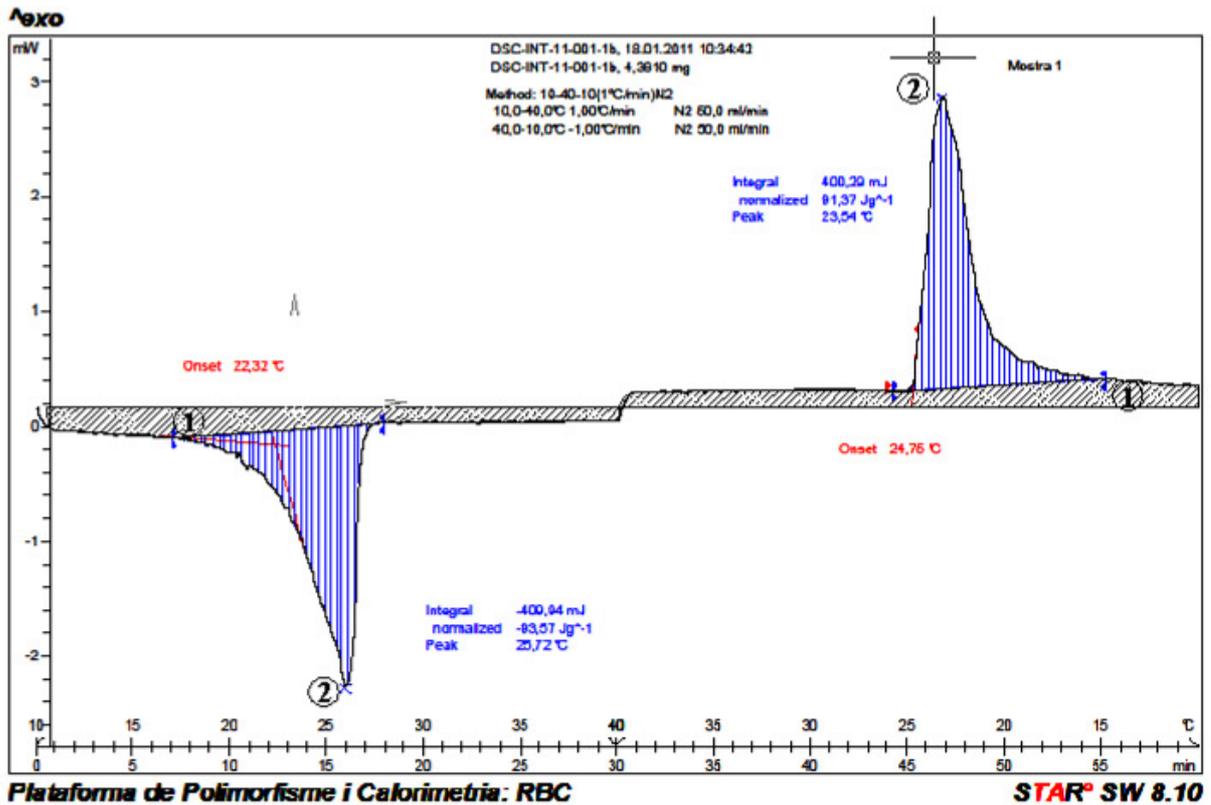


*Figura 16:* Curvas de flujo de calor frente la temperatura para GR42 (1-3mm).

En esta curva se ve claramente que el punto uno corresponde con el valor de calor sensible, siendo los otros dos, los asociados al calor latente. Esta muestra tiene mayor capacidad de almacenamiento de calor sensible (número uno), que los DSC que veremos a continuación, esto es por no ser únicamente material PCM, sino que este se encuentra contenido dentro de una estructura de partículas minerales naturales porosas.

Además tiene otra particularidad, y es que tiene dos picos asociados con dos rangos de almacenamiento de calor latente producido por un cambio de estado. Uno de valor menor cerca de los 20°C (número tres) , y el pico principal de valor muy superior, alrededor de 41°C (número dos). Este resultado indicaría que el producto GR42 está formado por una mezcla de parafinas con diferentes temperaturas de cambio de fase.

La figura 17 corresponde a una muestra de 4,38mg de masa de producto DS 5001X. En este caso, se calienta de 0 a 40°C y se enfría de 40 a 0°C.

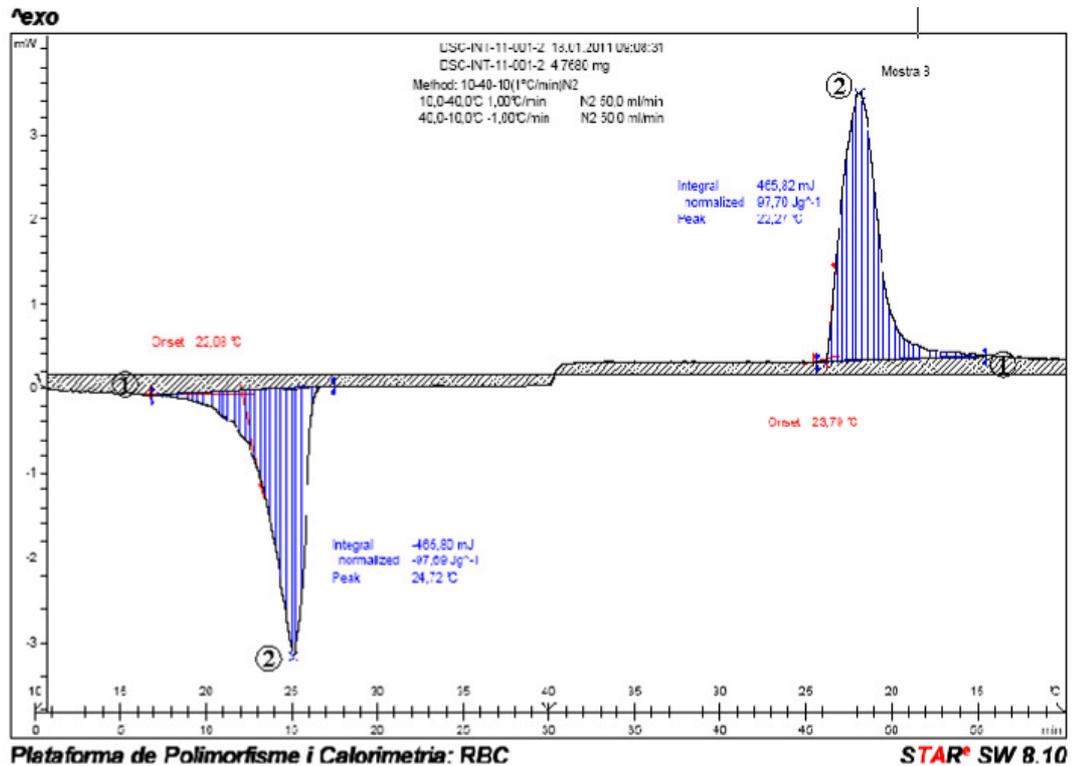


**Figura 17:** Curvas de flujo de calor frente la temperatura para DS 5001X.

En esta gráfica el valor de calor sensible (número uno), es menor que en la anterior, ya que la muestra es PCM puro micro-encapsulado y no existe otra sustancia como pasaba en el caso del gránulo del GR42.

En el caso de calor latente (número dos), sólo existe un pico correspondiente al cambio de fase, y se encuentra cerca de la temperatura de 26°C que es cuando debe ocurrir.

La figura 18 corresponde a una muestra de 4,77mg de masa de producto DS 5008X. En este caso, se calienta de 0 a 40°C y se enfría de 40 a 0°C.



**Figura 18:** Curvas de flujo de calor frente la temperatura para DS 5008X

Esta gráfica es muy parecida a la anterior, tiene un valor pequeño de calor sensible (número uno) ya que también es material PCM puro micro-encapsulado. Y sólo tiene un pico correspondiente a la fusión y otro para la solidificación (número dos), que muestran la capacidad de almacenamiento de calor latente en ellos. Ambos picos, se encuentran cerca de la temperatura de cambio de estado que es de 21°C.

**Obtención del calor específico efectivo.**

A fin de comparar las distintas curvas entre sí, es adecuado transformar los datos mostrados en el eje “y” (potencia expresada en mW) en calor específico efectivo.

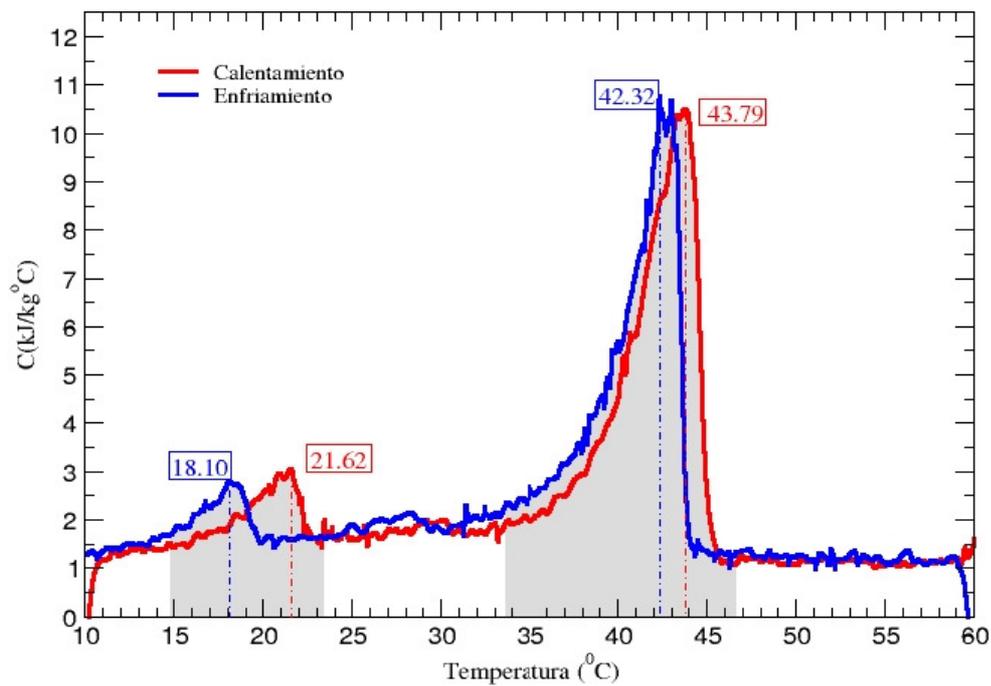
El calor específico efectivo representa el calor almacenado (sensible + latente), por unidad de masa y de grado centígrado, y puede obtenerse a partir de los datos de DSC, dividiendo entre la masa y el ritmo de calentamiento (o enfriamiento).

$$P \text{ (mW)} \longrightarrow C = P/m \times \Phi \text{ (KJ/Kg}^\circ\text{C)}$$

Donde:

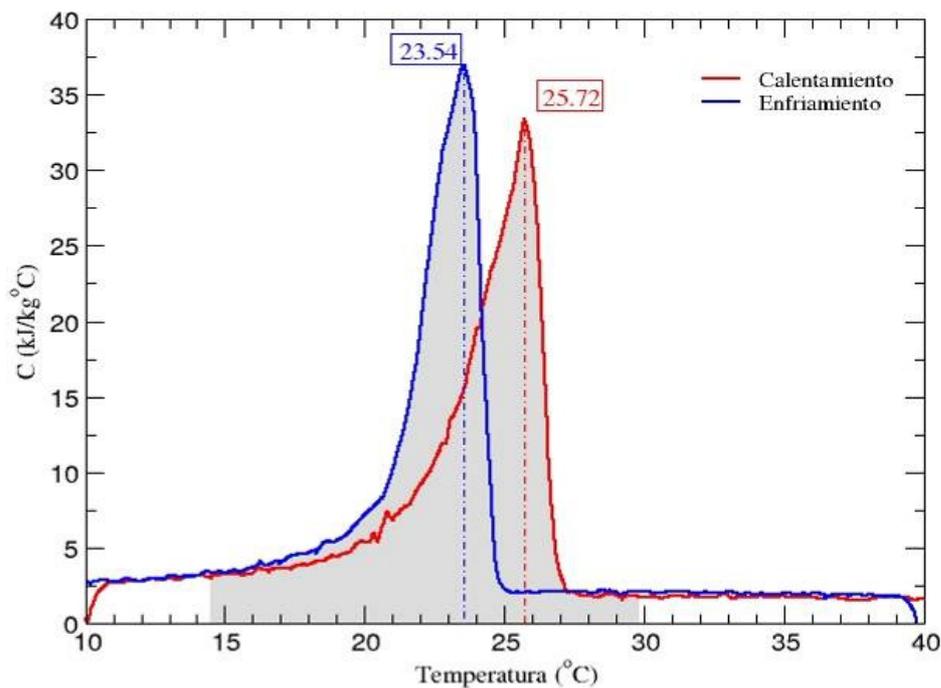
m = masa en mg;  $\Phi$  = ritmo en °C/s

En caso de hacer los experimentos a 1°C/min, tendríamos  $\Phi = 1/60$  °C/s.

GR42 (1-3mm)

**Figura 19:** Curvas de calor específico frente a la temperatura para GR42 (1-3mm).

Para estas curvas existen dos intervalos de cambio de fase, el principal desde 34 a 46,5  $^\circ\text{C}$  y el secundario desde 15 a 23 $^\circ\text{C}$ . El valor de almacenamiento de calor dentro del intervalo de temperaturas de confort humano es bajo, por lo que para el interior de estancias, no es el más adecuado. Sin embargo, si lo es para los materiales expuestos a radiaciones solares directas.

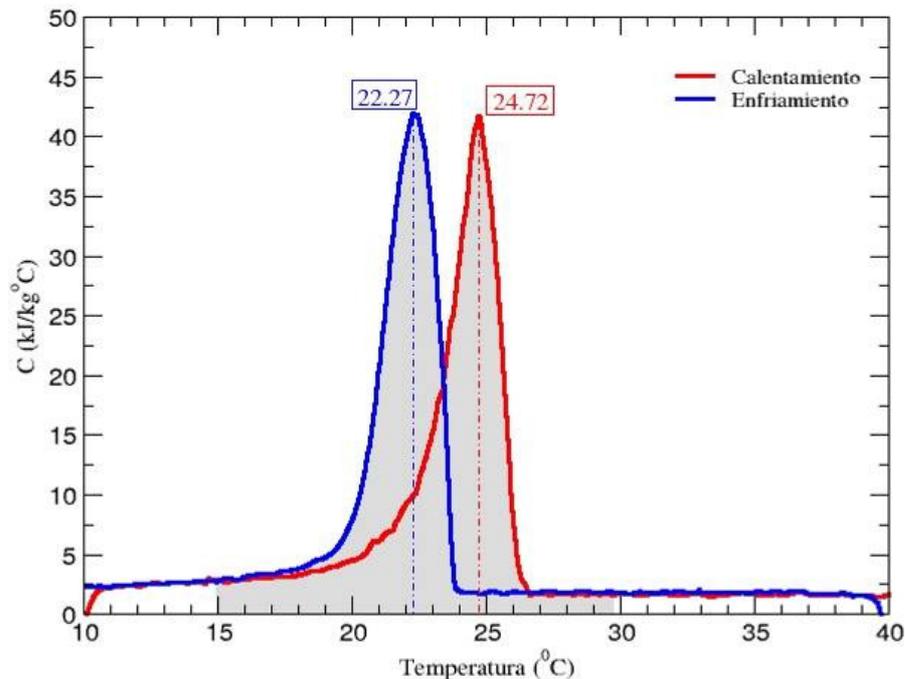
DS 5001X

**Figura 20:** Curvas de calor específico frente a la temperatura para DS 5001X.

### 34 Análisis de la viabilidad de usar materiales con PCM en edificación

En esta curva sólo existe un cambio de fase en el calentamiento y otro para el enfriamiento, ambos en un intervalo de 15 a 30 °C. Para este material, todo su intervalo engloba las temperaturas de confort humano, por lo que tiene buenos resultados para ser utilizado en el interior de estancias.

#### DS 5008X



**Figura 21:** Curvas de calor específico frente la temperatura para DS 5008X.

Esta gráfica comparándola con la anterior, sus cambios de fase se producen a menor temperatura, pero sigue siendo idónea para edificación, ya que tiene el mismo intervalo de cambio de fase, desde 15 a 30°C

La diferencia que tiene este material frente a los otros dos, es que tiene valores casi iguales de calor latente absorbido en el proceso de calentamiento y por lo tanto fusión del material; como el calor latente cedido en el proceso de enfriamiento y solidificación del mismo.

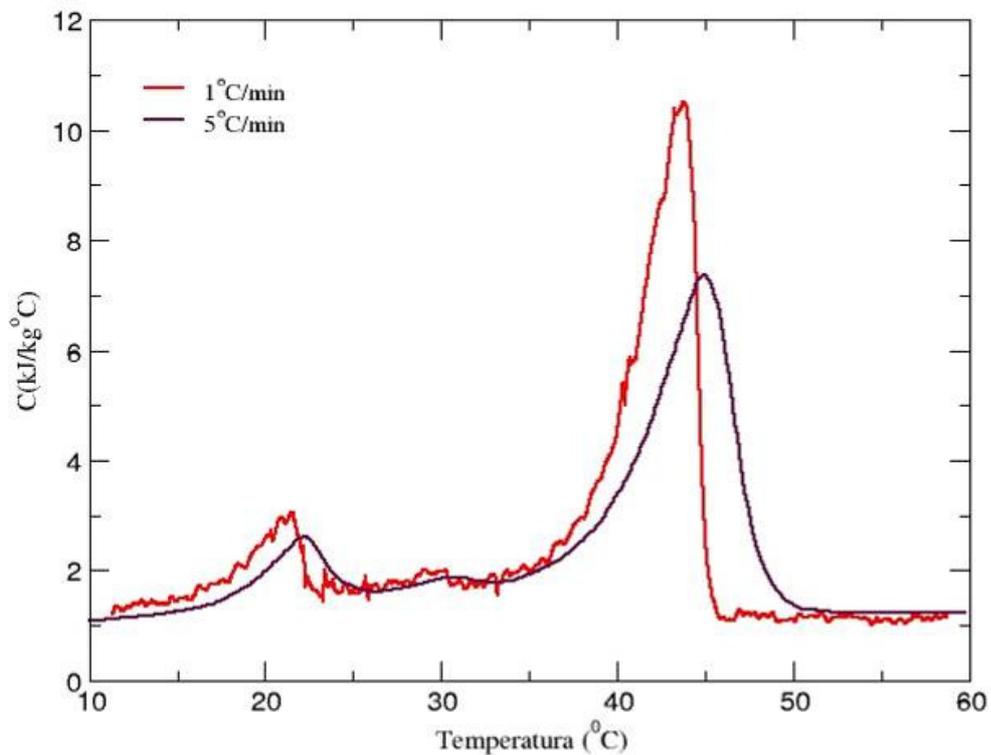
#### **Comparación de las curvas DSC según la velocidad del ensayo.**

Con el fin de verificar si el comportamiento que presenta los materiales es intrínseco, o esta influenciado por la velocidad y el rango de temperatura establecido, se ha hecho otro ensayo sólo con proceso de calentamiento, con un intervalo de 0 a 60°C y velocidad de 5°C/min.

En estas figuras que comparan las curvas para ambos ensayos, se observa que a mayor velocidad de variación de temperatura, el pico correspondiente al momento máximo de

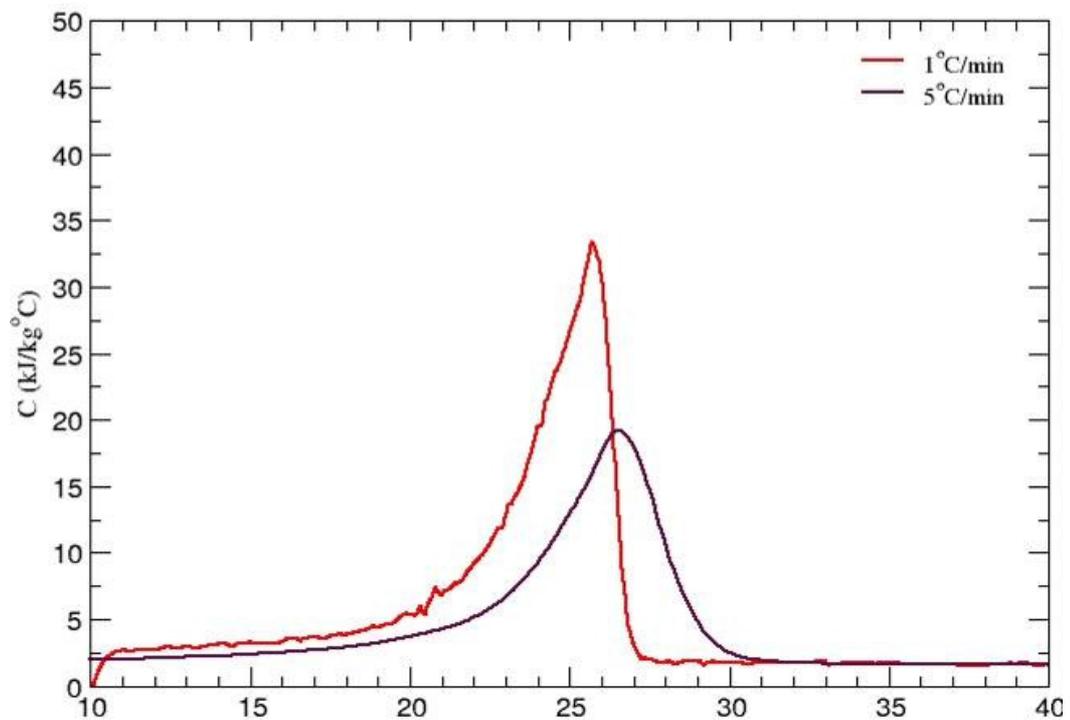
absorción de calor, tiene menor valor y aparece después. Lo que no varía en ambos ensayos, es el valor de almacenamiento total asociado al intervalo de cambio de estado.

GR42 (1-3mm).



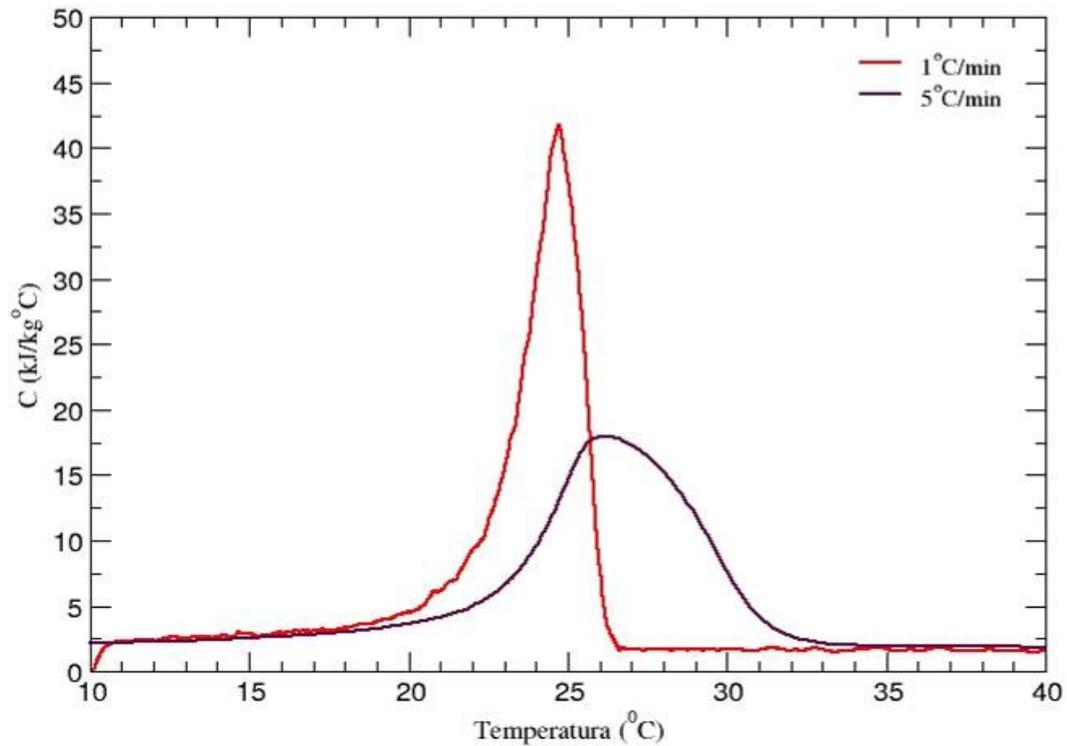
**Figura 22:** Curvas de flujo a diferentes velocidades de variación de  $T^a$ . Muestra de GR42

DS 5001X.



**Figura 23:** Curvas de flujo a diferentes velocidades de variación de  $T^a$ . Muestra de DS 5001X

DS 5008X.



**Figura 24:** Curvas de flujo a diferentes velocidades de variación de  $T^a$ . Muestra de DS 5008X

### **Comparación de los valores obtenidos con los valores comerciales.**

Las casas comerciales a la hora de clasificar el producto, lo hacen con tres parámetros importantes: la temperatura del punto de cambio de estado, el calor latente asociado a ese cambio de estado, y la capacidad de almacenamiento de calor tanto latente como sensible, a lo largo de todo el intervalo del cambio.

El único valor que no se tiene directamente observando las curvas, es el almacenamiento de calor total del intervalo. Para calcularlo es únicamente, integrar la parte de la curva de calor específico con los valores del intervalo del cambio de estado.

Estos valores se simbolizan en sombreado en color gris (Ver figura 19 para GR42, figura 20 DS 5001X y figura 21 DS 5008X).

A continuación se exponen las tablas comparativas con estos datos, para los tres materiales estudiados.

GR42 (1-3mm)									
	Calentamiento		Total	Enfriamiento		Total	Dato comercial	% Diferencia	
	Pico ppal.	Pico secnd.		Pico ppal.	Pico secnd.			Calnt	Enfr.
T <sup>a</sup> cambio de fase (°C)	43.79	21.62	-	42.32	18.10	-	41	-	-
Calor latente del cambio de fase (kJ/kg)	39.89	4.99	44.88	37	3.65	40.65	45	-0.27	-9.67
Almacenamiento térmico del intervalo de cambio de fase (kJ/kg)	57.51	55.54	-	17.65	16.85	-	57	-0.89	-2.56
Masa (mgr)	4.763	4.763	-	4.763	4.763	-	-	-	-
DS 5001X									
	Calentamiento		Enfriamiento		Dato comercial		% Diferencia		
							Calent.	Enfr.	
T <sup>a</sup> cambio de fase (°C)	25.72		23.54		26		-	-	
Calor latente del cambio de fase (kJ/kg)	93.57		91.37		110		-14.04	-16.94	
Almacenamiento térmico del intervalo de cambio de fase (kJ/kg)	135.21		130.53		145		-6.75	-9.98	
Masa (mgr)	4.381		4.381		-		-	-	
DS 5008X									
	Calentamiento		Enfriamiento		Dato comercial		% Diferencia		
							Calent.	Enfr.	
T <sup>a</sup> cambio de fase (°C)	24.72		22.27		23		-	-	
Calor latente del cambio de fase (kJ/kg)	97.69		97.70		100		-2.31	-2.3	
Almacenamiento térmico del intervalo de cambio de fase (kJ/kg)	132.16		129.20		135		-2.1	-4.3	
Masa (mgr)	4.768		4.768		-		-	-	

**Tabla 4:** Comparación de los datos térmicos obtenidos de los ensayos DSC con los citados por las casas comerciales.

**2.3 Ensayos realizados veso con PCM.**

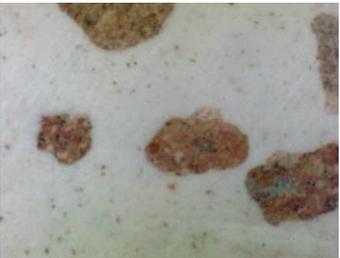
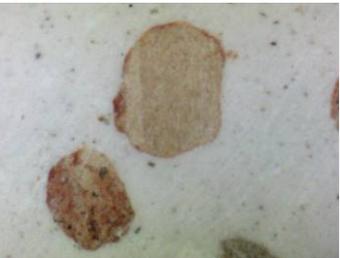
Esta parte del proyecto se destina a realizar ensayos en mezclas de yeso con los diferentes PCM estudiados anteriormente.

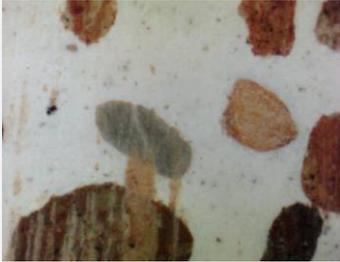
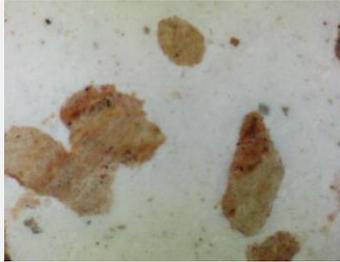
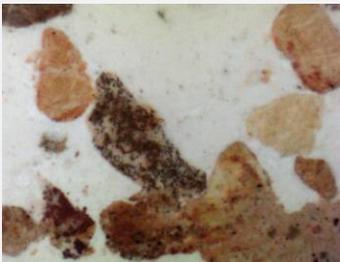
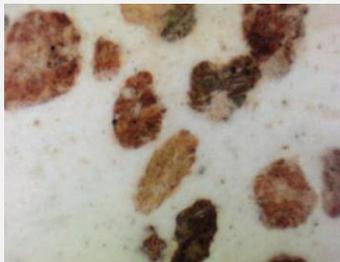
Se considera interesante el estudio con yeso, por la economía del material, la facilidad de incorporación, y su amplia utilización en construcción.

**2.3.1 Preparación de placas.**

Este ensayo sólo se realiza con el material PCM GR42. La razón es porque este material a diferencia del DS 5001X y DS5008X (cuyo tamaño de partículas es aproximadamente de 0,1 mm), presenta gránulos de tamaño desde 1 a 3mm. Estas dimensiones se consideran grandes, por lo que se decide observar como se mezclan estos gránulos con el yeso.

Con cinco moldes redondos de diámetro 7cm se realizan mezclas de GR42 con yeso, de diferentes porcentajes del material PCM en su composición. Una vez fraguado el yeso, se cortan por la mitad para observarlos con la lupa de 10 aumentos.

<b>5% PCM GR42</b>		
<b>Yeso (gr)</b>	<b>PCM GR42 (gr)</b>	<b>Agua (gr)</b>
100	5	73,5
		
Flanera 5% GR42	10 aumentos	10 aumentos
<b>10% PCM GR42</b>		
<b>Yeso (gr)</b>	<b>PCM GR42 (gr)</b>	<b>Agua (gr)</b>
100	10	77
		
Flanera 10% GR42	10 aumentos	10 aumentos

20% PCM GR42		
Yeso (gr)	PCM GR42 (gr)	Agua (gr)
100	20	84
		
Flanera 20% GR42	10 aumentos	10 aumentos
50% PCM GR42		
Yeso (gr)	PCM GR42 (gr)	Agua (gr)
80	40	84
		
Flanera 50% GR42	10 aumentos	10 aumentos
60% PCM GR42		
Yeso (gr)	PCM GR42 (gr)	Agua (gr)
70	42	78,4
<p>Mayor concentración en la superficie de la mezcla.</p> 		
Flanera 60% GR42	10 aumentos	10 aumentos

**Figura 25:** Tabla resumen de las cinco piezas realizadas con yeso y PCM GR42

Se observa que la adherencia entre los gránulos del material GR42 y el yeso es perfecta. No hay huecos, coqueas.. etc. Al partir las piezas se han partido los gránulos en lugar de arrancarse, lo que demuestra que forman parte de la mezcla.

Respecto a la homogeneidad de la mezcla, se observa (sobre todo en las piezas con mayor cantidad de PCM), que no es totalmente homogénea. Ya que al existir una diferencia notable de densidad entre el yeso y el PCM GR42, este queda más concentrado en la superficie. No es

#### 40 Análisis de la viabilidad de usar materiales con PCM en edificación

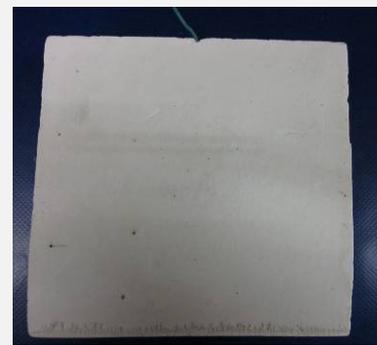
demasiado pronunciado, ya que el yeso tiene un fraguado bastante rápido y muy buena adherencia sobre el gránulo, por lo que no le permite a este subir muy rápido a la superficie del molde.

En un estudio previo sobre PCM (Campos. S. Incorporación de PCM en elementos constructivos para la mejora energética. 2009-2010), se realizaron dos placas con las mismas características (diferentes mezclas) que las realizadas en laboratorio, que vamos a utilizar en los ensayos de los puntos siguientes del presente proyecto. Una es yeso con 10% PCM DS 5001X y la otra es con 10% PCM DS 5008X.

Se considera interesante la realización de cuatro placas con las mismas dimensiones que las anteriores (14 cm de largo, 14 cm de ancho y 4 cm de espesor), con las siguientes composiciones: yeso sólo, yeso con 50% de PCM GR42, yeso con 5% de PCM DS 5001X y 5% de PCM DS 5008X; y yeso con 10% de PCM DS 5001X y 10% de PCM DS 5008X.

Al igual que las dos placas del curso pasado, llevaran a mitad de su grosor, un termopar para registrar los valores de temperatura en el centro de la placa. Para esto, se echa una tongada de la mezcla en el molde hasta la mitad del grosor final de la placa (h=2cm), se coloca el cable, y se echa la segunda tongada hasta la parte superior del molde.

<b>%Material cambio de fase</b>	0%
<b>Tipo de PCM</b>	-
<b>Materiales</b>	<b>Cantidad (gr)</b>
Yeso	390
PCM	-
Agua	273
<b>%Material cambio de fase</b>	50%
<b>Tipo de PCM</b>	GR42
<b>Materiales</b>	<b>Cantidad (gr)</b>
Yeso	260
PCM GR42	130
Agua	273

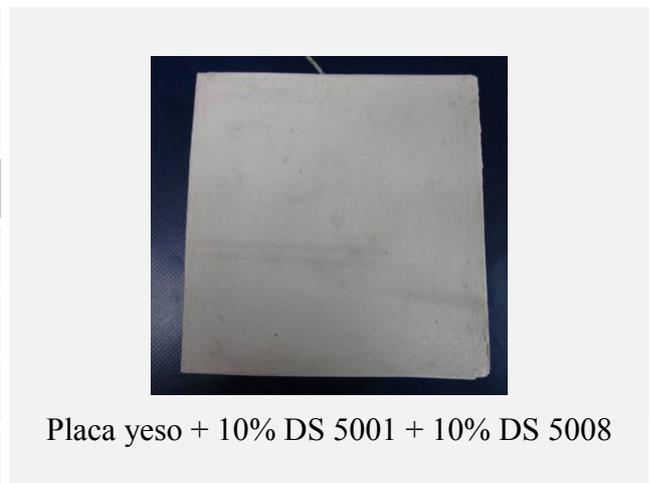


Placa yeso



Placa yeso + 50% GR42

<b>%Material cambio de fase</b>	10%
<b>Tipo de PCM</b>	DS 5001X, DS5008X
<b>Materiales</b>	<b>Cantidad (gr)</b>
Yeso	400
DS 5001X	20
DS 5008X	20
Agua	308
<b>%Material cambio de fase</b>	20%
<b>Tipo de PCM</b>	DS 5001X, DS5008X
<b>Materiales</b>	<b>Cantidad (gr)</b>
Yeso	400
DS 5001X	40
DS 5008X	40
Agua	336



**Tabla 5:** Tabla resumen de las cuatro placas realizadas con yeso y materiales PCM

**2.3.2 Obtención de propiedades de las placas.**

Masa (m): para obtener este valor, se pesa la placa en la balanza electrónica.

Volumen (V): se obtiene midiendo las tres dimensiones de la placa con el pie de rey.

Densidad (ρ): a partir de los datos obtenidos de masa y volumen de la placa.  $\rho = m / V$ .

Analizador de propiedades térmicas: se ha utilizado un analizador térmico, QUICKLINE-30<sup>TM</sup> que permite calcular: calor específico\*densidad, conductividad térmica y difusividad térmica de la pieza.

Calor específico (Ce): el analizador de propiedades térmicas proporciona el valor de calor específico × densidad. Como el valor de la densidad se ha obtenido anteriormente, se divide entre este, resultando así el valor del calor específico.

Conductividad (λ) y Difusividad térmica (α): se obtienen directamente del analizador de propiedades.

## 42 Análisis de la viabilidad de usar materiales con PCM en edificación

A continuación se resumen los valores de las propiedades térmicas de las placas analizadas a temperatura ambiente.

	<b>Masa (Kg)</b>	<b>Volumen (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Densidad (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Calor específico (J×K/Kg)</b>	<b>Conductividad térmica (W/m×K)</b>	<b>Difusividad (m<sup>2</sup>/s)</b>
<b>Yeso</b>	0,873	8,543*10 <sup>-4</sup>	1.022,130	1.477,301	0,324	0,214×10 <sup>-6</sup>
<b>Yeso + 50% GR42</b>	0,793	8,913*10 <sup>-4</sup>	889,674	1.742,211	0,299	0,190×10 <sup>-6</sup>
<b>Yeso + 10% DS5001X</b>	0,856	8,979*10 <sup>-4</sup>	953,820	1.666,975	0,332	0,209×10 <sup>-6</sup>
<b>Yeso + 10% DS5008X</b>	0,806	8,415*10 <sup>-4</sup>	957,173	1.692,484	0,327	0,202×10 <sup>-6</sup>
<b>Yeso + 5% DS5001X + 5% DS5008X</b>	0,751	8,521*10 <sup>-4</sup>	881,344	1.690,599	0,294	0,184×10 <sup>-6</sup>
<b>Yeso + 10% DS5001X + 10% DS5008X</b>	0,829	1,044*10 <sup>-3</sup>	793,796	2.015,630	0,297	0,186×10 <sup>-6</sup>

**Tabla 6:** Tabla resumen de las propiedades térmicas para las placas.

De la tabla anterior se obtienen las siguientes conclusiones:

-El introducir material PCM en su composición, baja la densidad de las placas, ya que estos materiales son menos densos que el propio yeso.

-Se observa que la placa que menos calor específico tiene es la de yeso. En el caso de micronal, al tener el cambio de fase a temperaturas bajas (típicamente las del ambiente), este cambio puede afectar a la medida, obteniéndose por eso un mayor valor del calor específico. En el caso de la placa con GR42, esto no ocurre, porque aún teniendo mayor cantidad de PCM esta placa, su temperatura de cambio de fase es muy superior a la temperatura ambiente del laboratorio en el momento de obtención de las propiedades.

-Los valores de conductividad térmica y difusividad se analizan juntos, porque están directamente relacionados. El mayor valor es para la placa de yeso solo. Cuando se introduce a la composición de las placas material PCM, estos valores disminuyen. Esto es debido a que los materiales PCM son parafinas y tienen un bajo valor de conductividad térmica.

Para las tres placas con parafinas, los valores son parecidos, incluso para la placa de GR42 aunque esta tenga mucha más cantidad de PCM. En realidad, esta placa tiene más % de PCM, pero hay que recordar que no todo el porcentaje corresponde a parafina, sino al conjunto del gránulo (parafina dentro de una estructura de material mineral poroso).

### **2.3.3 Experimentos a escala de laboratorio.**

Todas las placas tienen colocado en su interior un termopar para poder recoger los datos de las temperaturas interiores. Para obtener las temperaturas superficiales, se les coloca otro termopar pegado a la superficie. Ambos se conectan con el termopar y se graban los datos que luego se leerán mediante el software del aparato.

En los experimentos, ni las temperaturas ni la duración de los procesos se ajustan a la realidad, pero lo que se quiere analizar son los diferentes comportamientos de cada placa con material PCM respecto la placa de yeso solo, sometidas ambas a las mismas circunstancias. La toma de datos en todos los casos será cada 10 segundos.

Los pasos que se han seguido son los siguientes:

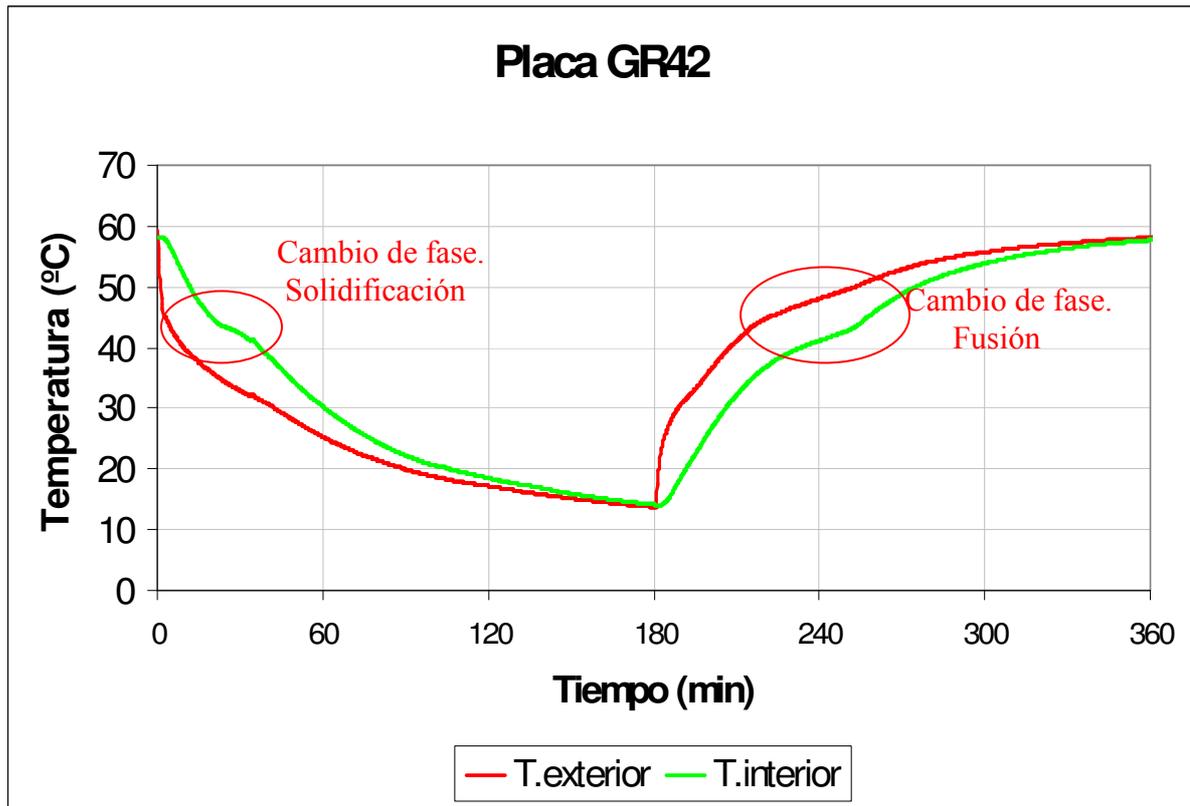
-Primero: permanecen en la estufa alrededor de 24, se comienza a grabar datos en el termopar y controla el tiempo con el cronómetro.

-Segundo: se cambia a la nevera (10°C), donde permanece durante 180 minutos.

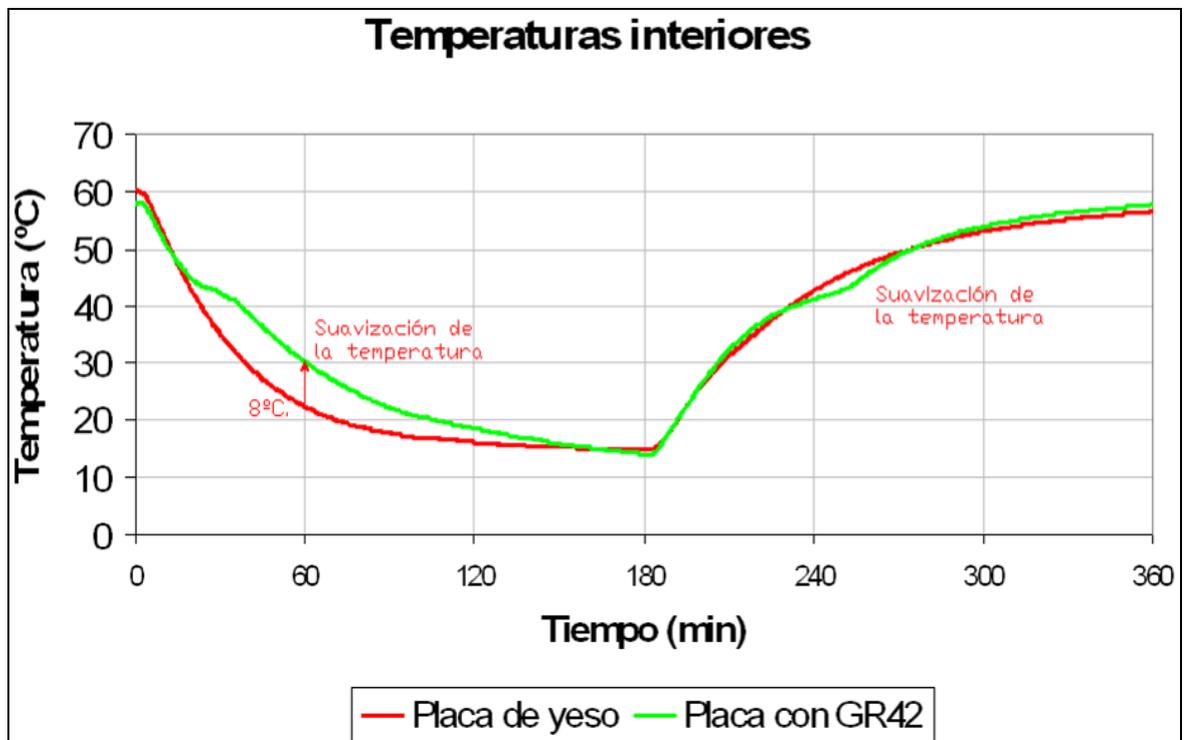
-Tercero: se vuelve a pasar a la estufa (50°C / 60°C), donde permanecerá otros 180 minutos.

En el caso de la placa GR42 su cambio de fase se realiza alrededor de 41°C, por lo que para ver el efecto de manera más visible, para esta placa y para la de yeso (que es con la que se compara) se realiza otra simulación con la estufa a 60°C.

Comportamiento térmico de la placa con PCM 50% GR42 (1-3mm)



*Figura 26:* Temperaturas interiores y exteriores de la placa 50% GR42



*Figura 27:* Comparación  $T^a$  interiores de la placa de yeso y placa 50% GR42

Comportamiento térmico de la placa con PCM 10% DS 5001X

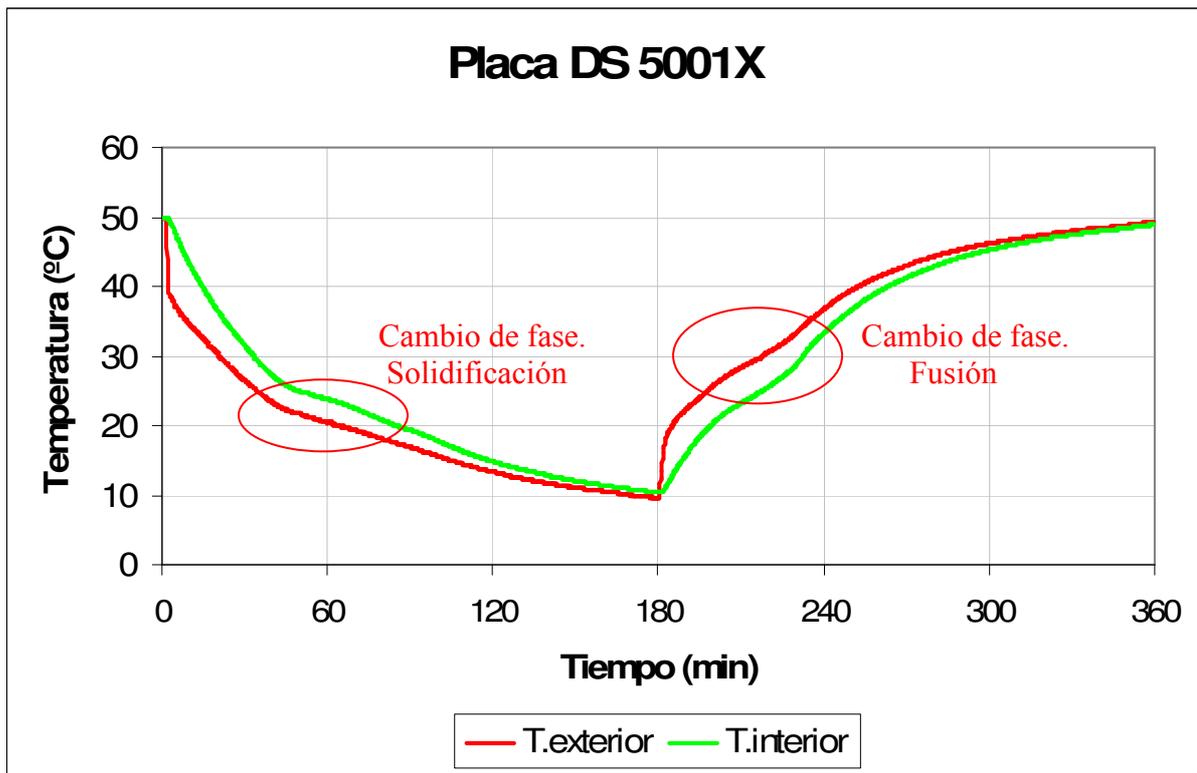


Figura 28: Temperaturas interiores y exteriores para la placa 10% DS5001X

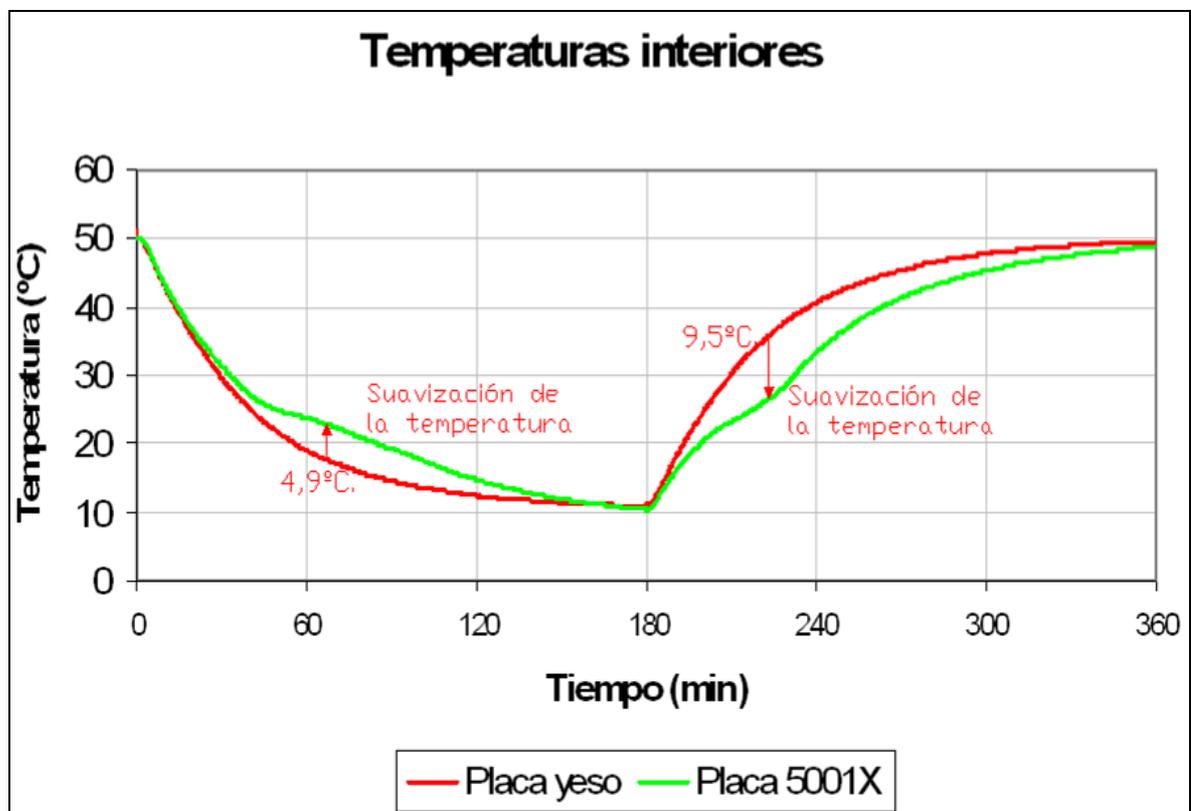
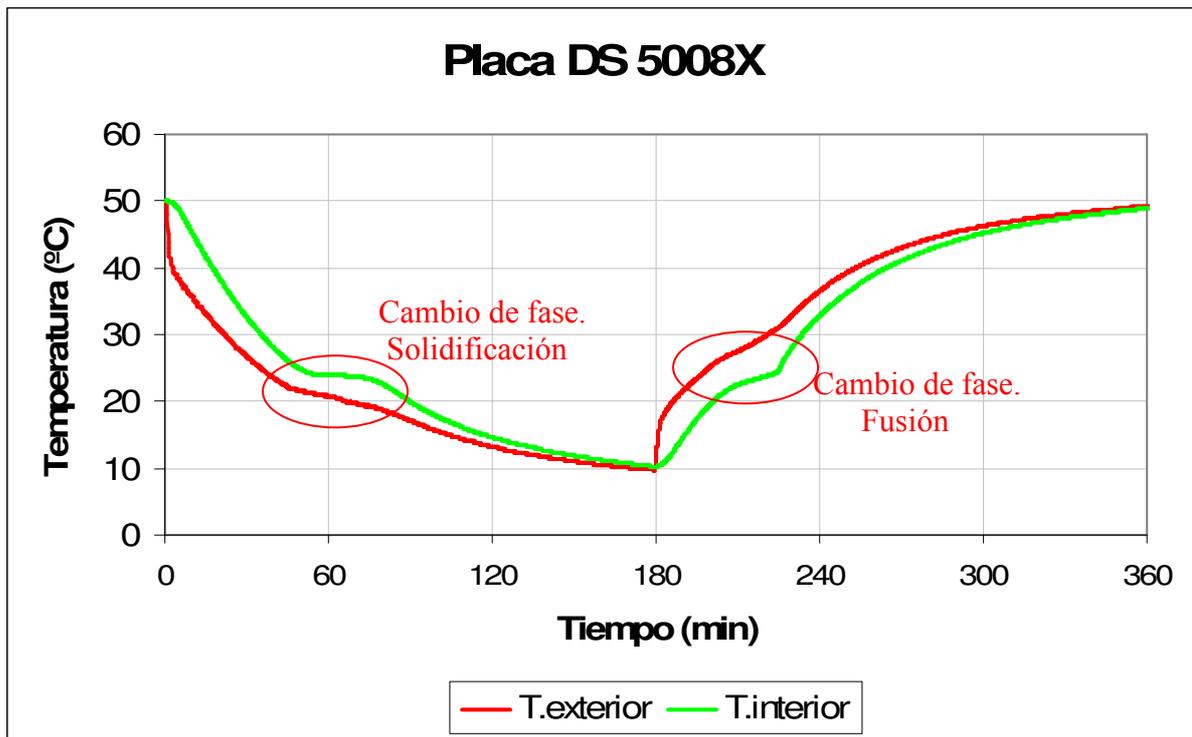
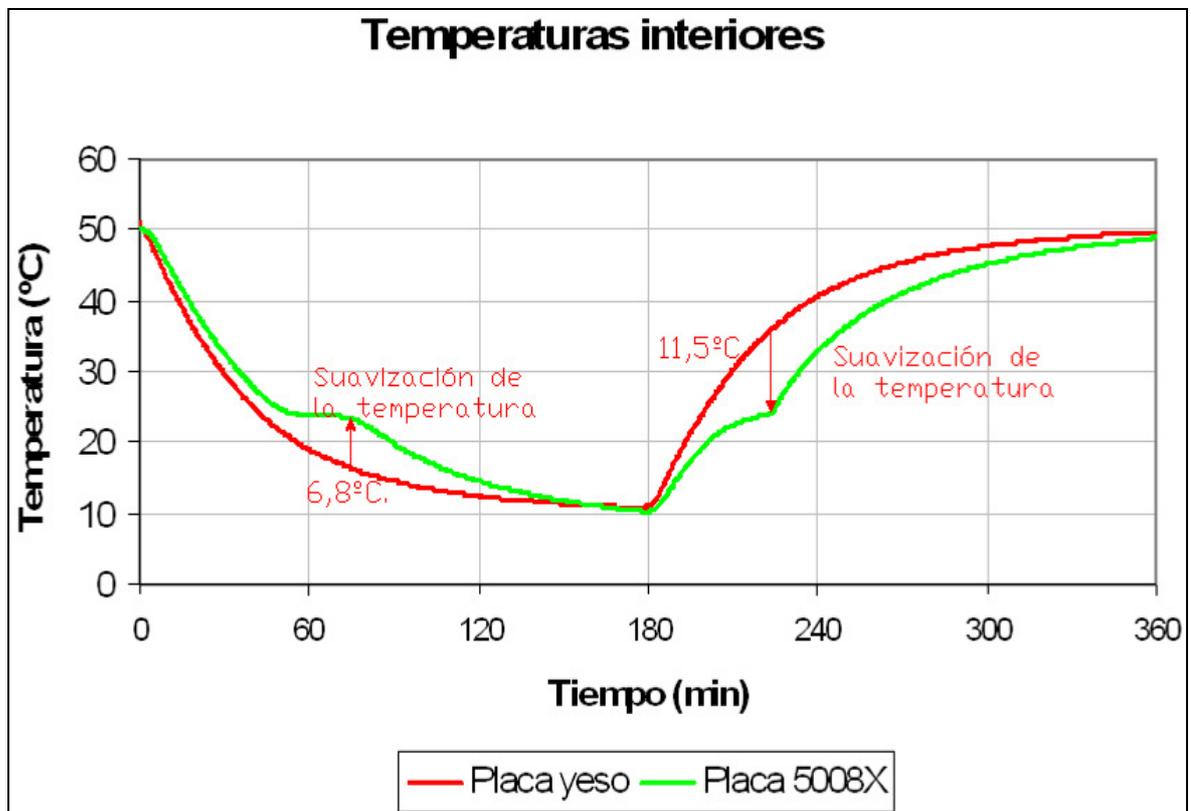


Figura 29: Comparación Tª interiores para la placa de yeso y placa 10% DS5001X

Comportamiento térmico de la placa con PCM 10% DS 5008X



*Figura 30:* Temperaturas interiores y exteriores para la placa 10% DS5008X



*Figura 31:* Comparación T<sup>a</sup> interiores para la placa de yeso y placa 10% DS5008X

Comportamiento térmico de la placa con PCM 5%DS 5001X y 5%DS 5008X

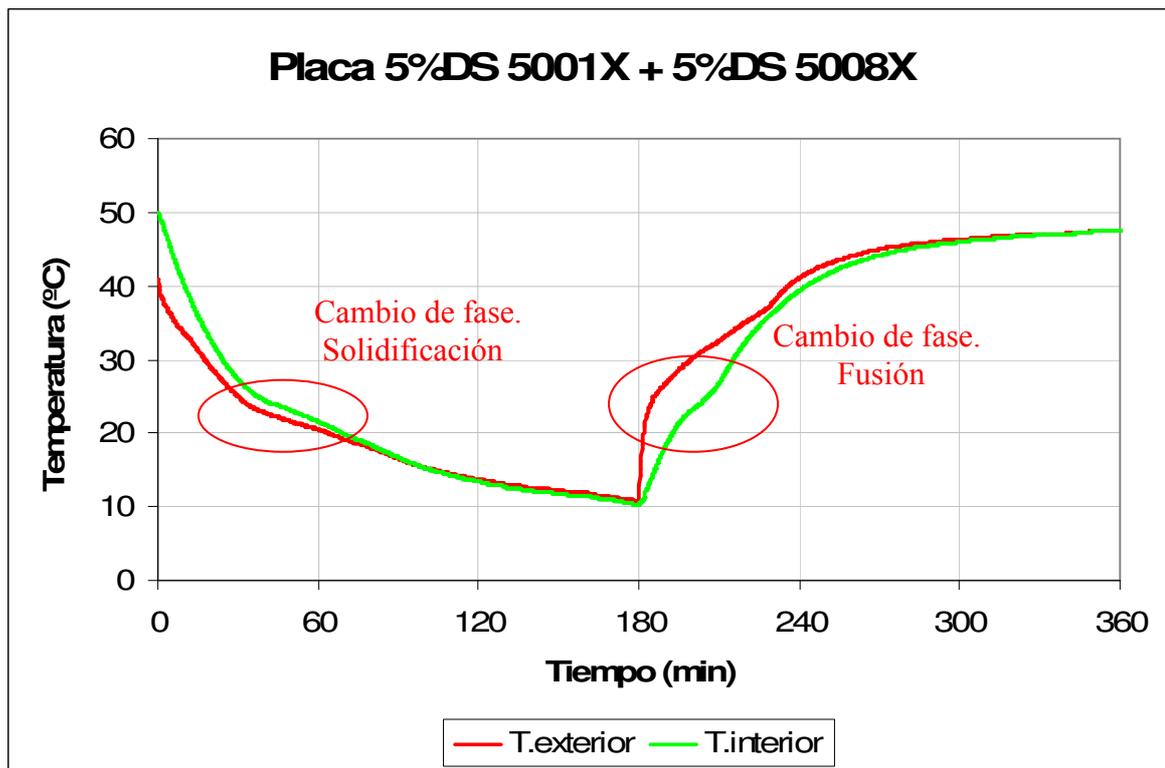


Figura 32: Temperaturas interiores y exteriores para la placa 5% DS5001+5% DS5008

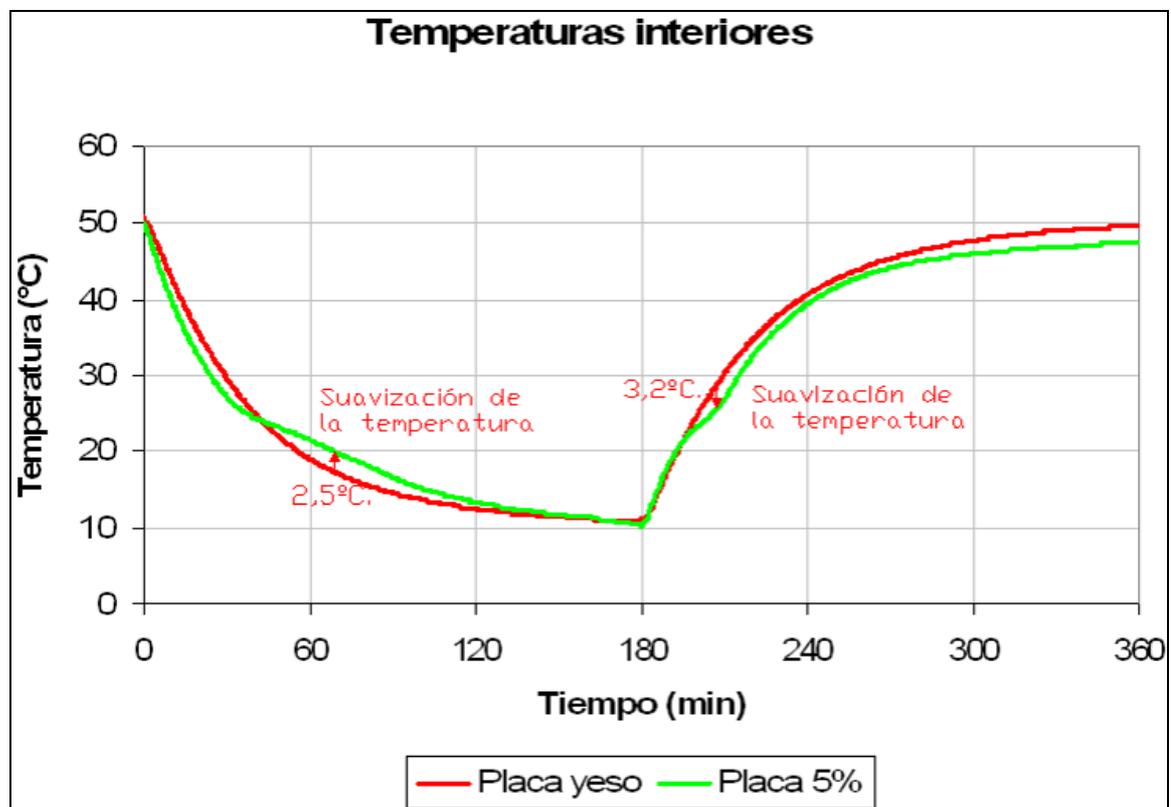
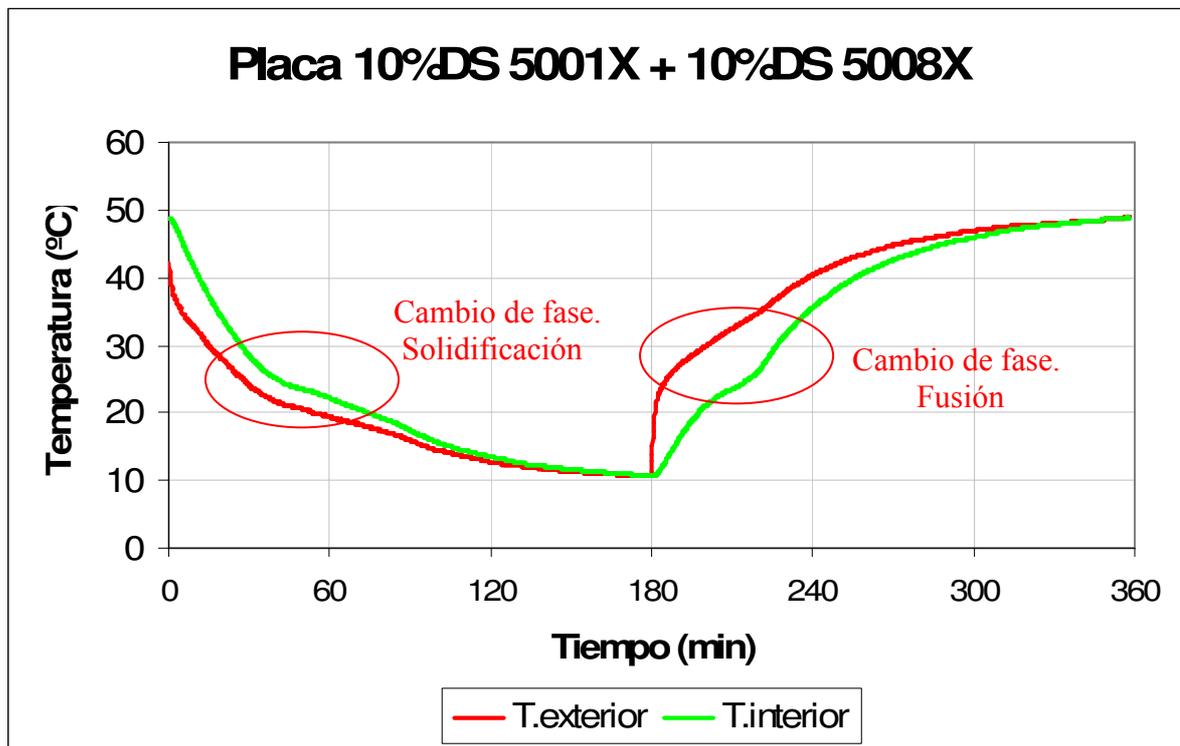
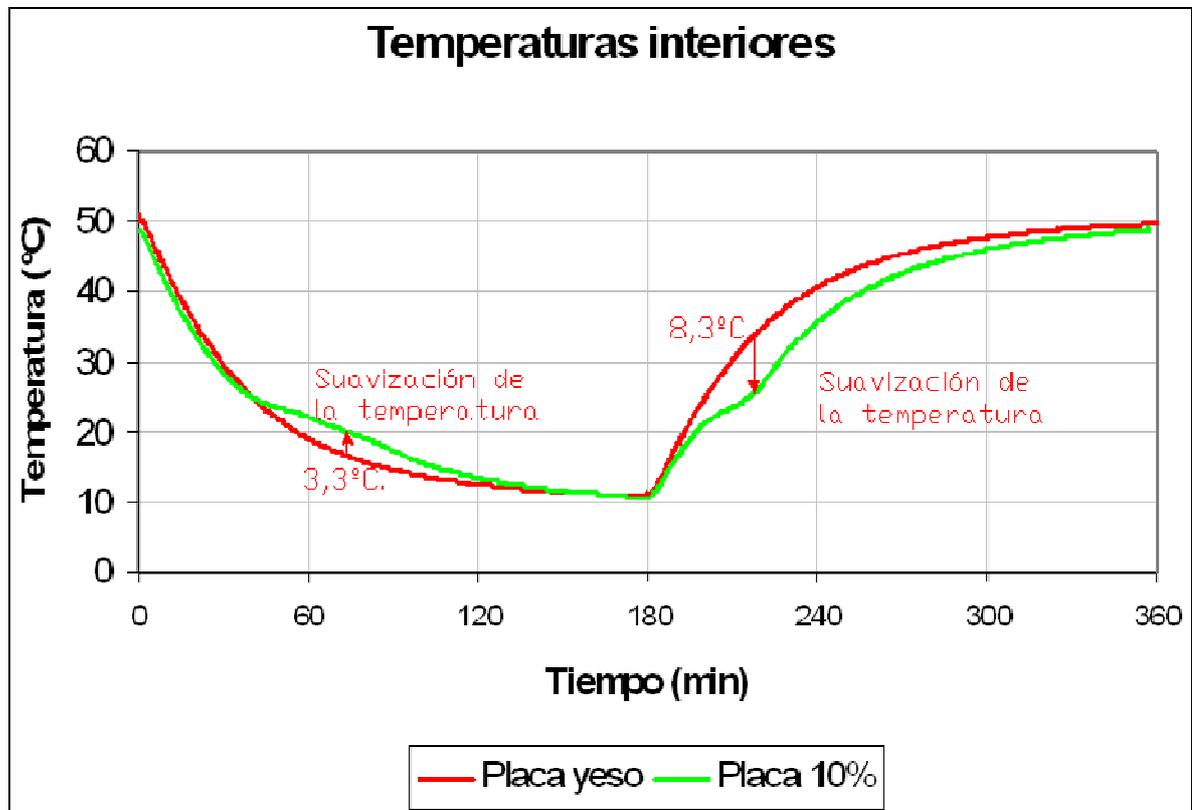


Figura 33: Comparación Tª interiores para la placa de yeso y placa 5% DS5001+5% DS5008

Comportamiento térmico de la placa con PCM 10%DS 5001X y 10%DS 5008X



*Figura 34:* Temperaturas interiores y exteriores para la placa 10% DS5001+10% DS5008



*Figura 35:* Comparación T<sup>a</sup> interiores para placa de yeso y placa 10% DS5001+10% DS5008

Comparativa de temperaturas interiores de todas las placas.

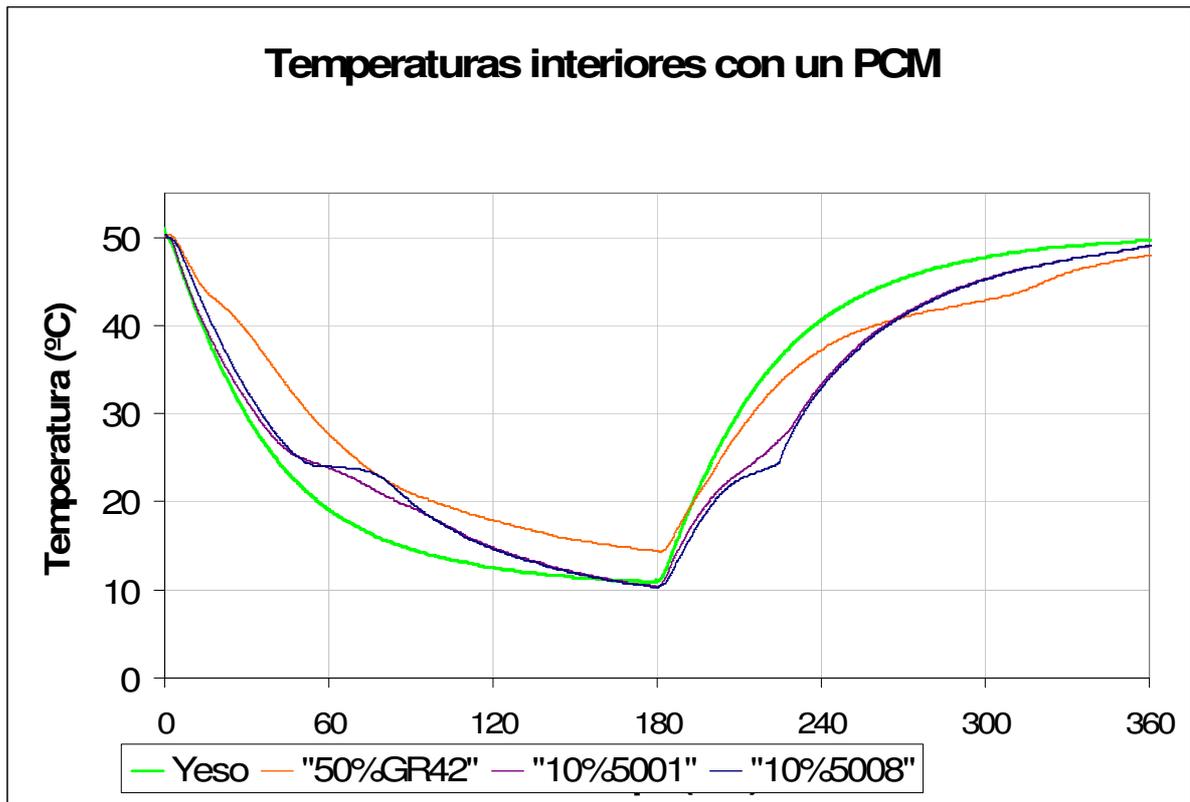


Figura 36: Comparación T<sup>a</sup> interiores para placa de yeso y placas con un tipo de PCM

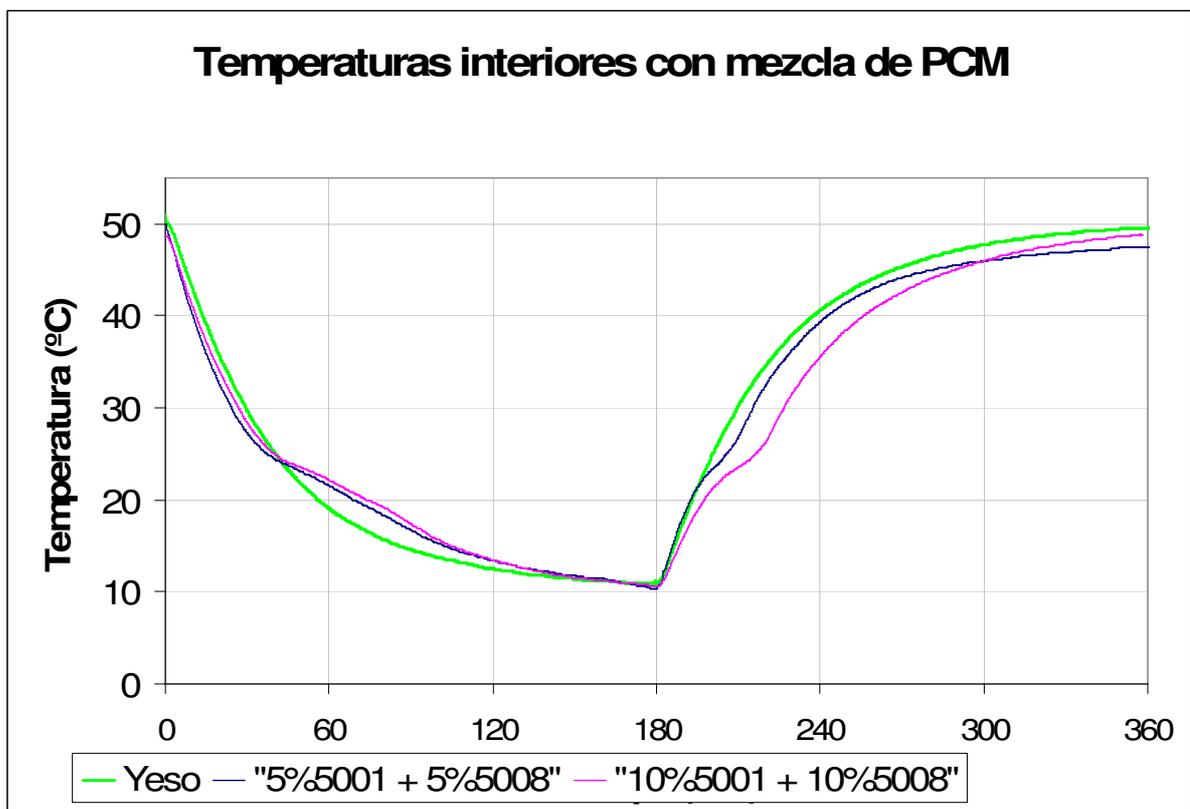


Figura 37: Comparación T<sup>a</sup> interiores para placa de yeso y placas con mezcla de PCM

Conclusiones de los experimentos en laboratorio.

Para cada una de las placas, se han comparado los resultados con los obtenidos para una placa de yeso, y así quedar de manera más clara visualmente, la suavización de las temperaturas que experimentan las placas que contienen PCM en su composición.

En las placas que contienen material PCM, alrededor de su temperatura de cambio de fase se observa como la curva se aplanan respecto la curva de yeso solo. Esto es debido a que se está produciendo el cambio de fase del material PCM, y la energía calorífica que les lleva, la gastan en realizar el cambio de fase en lugar de variar su temperatura.

-En el caso de la placa con PCM 50% GR42, en el proceso de enfriamiento, en tiempo igual a una hora, existe una diferencia de temperaturas de 8°C.

-Para la placa con PCM 10% DS 5001X, alrededor del minuto 45 del proceso de calentamiento, la diferencia de temperatura entre ambas placas es de 9,5°C.

-Para la placa con PCM 10% DS 5008X, alrededor del minuto 45 del proceso de calentamiento, la diferencia de temperatura entre ambas placas es de 11,5°C. Es la placa que tiene más visible el cambio de fase con menor cantidad de material PCM.

-Para la placa con PCM 5% DS 5001X y 5% DS 5008X, alrededor del minuto 30 del proceso de calentamiento, la diferencia de temperatura entre ambas placas es de 3,2°C. En esta placa se observa muy poco efecto del material PCM.

-Para la placa con PCM 10% DS 5001X y 10% DS 5008X, alrededor del minuto 40 del proceso de calentamiento, la diferencia de temperatura entre ambas placas es de 8,3°C.

En las figuras 36y 37 se comparan conjuntamente todas las placas. En ellas podemos observar como el material PCM que tiene la llanura más pronunciada, y por lo tanto, provocando un desfase temporal en las temperaturas, es el material PCM DS 5008X.

Este resultado podría parecer sorprendente ya que el PCM DS 5001X tiene mayor calor latente que el DS 5008X. Sin embargo, tal como se observa en la Figura 21 del capítulo 2.2.3, la curva DSC para el DS 5008X es más estrecha y presenta un máximo más elevado. Esta forma es compatible con un aplanamiento en la temperatura más pronunciado.

En el caso de GR42, el aplanamiento que presenta también es menos pronunciado aún teniendo mayor porcentaje de material PCM. La razón es la misma, como se observa en la figura 19 del capítulo 2.2.3, la curva DSC es más ancha y no presenta un máximo demasiado

elevado para la cantidad de PCM que contiene. Además, añadir que para este caso, se observa un segundo aplanamiento, debido al pico secundario de la curva DSC alrededor de los 20°C.

A continuación se muestran las Figuras DSC a modo de recordatorio.

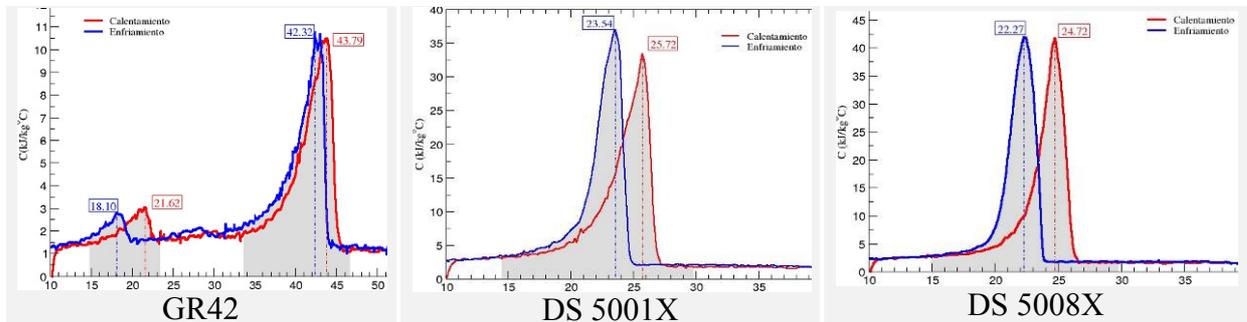


Figura 38: Recordatorio de las figuras 19, 20, 21 del Capítulo 2.2.3.

**2.3.4 Ensayos mecánicos en probetas prismáticas.**

Para comprobar cómo afecta mecánicamente la incorporación de materiales PCM en el yeso, se han realizado dos tipos de probetas prismáticas para romperlas a esfuerzos de flexo-tracción y compresión, y así poder comparar los resultados. Las probetas prismáticas tienen dimensiones de 16cm de largo, 4 cm de ancho y 4cm de espesor.

	%Material cambio de fase	Tipo de PCM	Yeso (gr)	DS 5001X (gr)	DS 5008X (gr)	Agua (gr)
<b>Probetas prismáticas yeso</b>	-	-	-	-	-	112
<b>Probetas prismáticas yeso + PCM</b>	20	DS 5001X, DS 5008X	130	13	13	160

Tabla 8: Composición de los dos tipos de mini-placas que se rompen mecánicamente.

Se realizan seis probetas prismáticas en total, tres son de yeso y tres de yeso con un 20% de PCM. Cada pareja (yeso; yeso + PCM), se somete a condiciones diferentes:

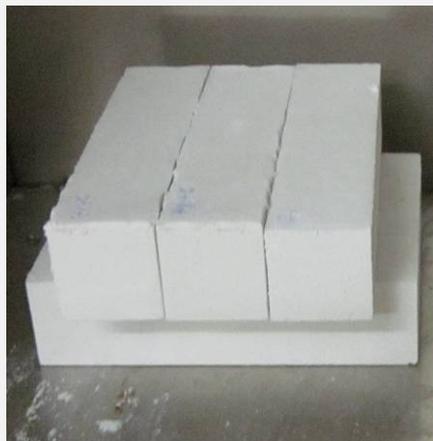
- Una pareja se somete a ciclos de envejecimiento. Se realizan cambios de la estufa a la nevera, y viceversa, con un total de 25. La estufa se encuentra a 50°C y la nevera a 10°C.
- Otra pareja se somete a estos mismos ciclos de envejecimiento, pero además aguanta la temperatura de 90°C en un ciclo.
- La última pareja no se somete a ningún tipo de envejecimiento.

Estas seis probetas prismáticas parten en dos trozos bajo esfuerzos de flexo-tracción, quedando doce partes, que se ensayan luego a esfuerzos de compresión.

## 52 Análisis de la viabilidad de usar materiales con PCM en edificación

La finalidad de realizar estos dos ensayos mecánicos es observar las tensiones máximas que pueden aguantar las probetas prismáticas, y así poder analizar como influye que tengan material PCM en su composición y que hayan estado, o no, sometidas a ciclos de envejecimiento.

Los ensayos se realizan en una prensa hidráulica para determinar la tensión que soportan. El método de ensayo se explica en el ANEXO III de este proyecto.



**Foto 20:** Probetas prismáticas



**Foto 21:** Rotura flexo-tracción



**Foto 22:** Rotura compresión

### Ensayo a flexo-tracción y compresión.

Tras los datos obtenidos de los ensayos de flexo-tracción y compresión, se observa:

- Dentro de cada pareja no se hay influencia negativa respecto los valores de resistencia de los esfuerzos, por tener material PCM en su composición.
- Respecto a los valores obtenidos en las parejas que han sufrido los ciclos de envejecimiento, respecto de la que no, no tienen valores menores.
- Y por último, la pareja que además ha soportado la temperatura de 90°C, tampoco presenta datos por debajo de las otras.

En general, no hay ningún comportamiento que se deba destacar. Por lo que se concluye diciendo, que no se observan anomalías en el esfuerzo a flexo-tracción ni en el de compresión, por el uso de PCM en la composición de probetas prismáticas de yeso.

Cabe señalar que se tratan de resultados estimativos, ya que no se ha realizado una estadística adecuada. A continuación se exponen los resultados.

Nº	FOTOGRAFÍA DE LA ROTURA	MEZCLA	CICLOS DE ENVEJECIMIENTO	SOMETIDA A 90°C	RESISTENCIA (Kgs máx.)
1		YESO	SI	SI	34,49
2		YESO + PCM	SI	SI	46,95
3		YESO + PCM	SI	-	35,38
4		YESO	SI	-	60,06
5		YESO + PCM	-	-	44,46
6		YESO	-	-	39,24

**Tabla 9:** Resultados de los ensayos de flexo-tracción para las probetas prismáticas.

54 Análisis de la viabilidad de usar materiales con PCM en edificación

N°	FOTOGRAFÍA DE LA ROTURA	MEZCLA	CICLOS DE ENVEJECIMIENTO	SOMETIDA A 90°C	RESISTENCIA (Kgs máx.)
1		YESO	SI	SI	273,09
2		YESO + PCM	SI	SI	200,02
3		YESO + PCM	SI	-	215,24
4		YESO	SI	-	379,49
5		YESO + PCM	-	-	253,02
6		YESO	-	-	232,44

**Tabla 10:** Resultados de los ensayos de compresión para las probetas prismáticas.

**2.4 Ensayos realizados en muestras de cemento con PCM.**

Esta parte del proyecto se destina a realizar ensayos a mezclas de cemento con los diferentes PCM estudiados anteriormente.

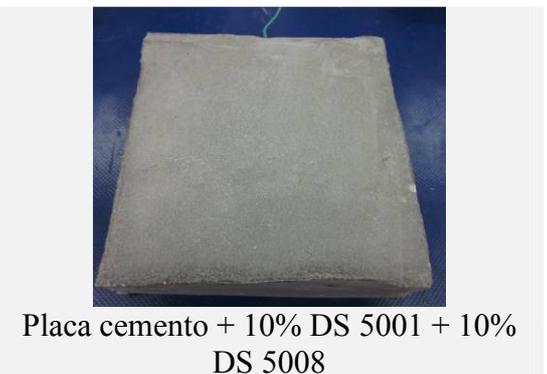
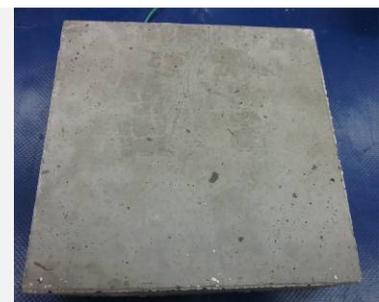
Los motivos que llevan a elegir el cemento como material para estudiar su comportamiento con los PCM, son los mismos que para el yeso: economía del material, facilidad de incorporación, y su amplia utilización en construcción.

**2.4.1 Preparación de placas.**

Estas placas tienen las mismas dimensiones que las realizadas con yeso, y al igual que ellas, llevan en el centro de su grosor un termopar para que registre los valores de las temperaturas en el centro de la placa.

Después de desmoldar las placas, estas permanecieron en la cámara húmeda para favorecer las condiciones del curado del cemento.

<b>%Material cambio de fase</b>	0%
<b>Tipo de PCM</b>	-
<b>Materiales</b>	<b>Cantidad (gr)</b>
Cemento	420
PCM	-
Agua	200
<b>%Material cambio de fase</b>	50%
<b>Tipo de PCM</b>	GR42
<b>Materiales</b>	<b>Cantidad (gr)</b>
Cemento	300
PCM GR42	150
Agua	200
<b>%Material cambio de fase</b>	20%
<b>Tipo de PCM</b>	DS 5001X, DS5008X
<b>Materiales</b>	<b>Cantidad (gr)</b>
Cemento	380
DS 5001X	38
DS 5008X	38
Agua	200



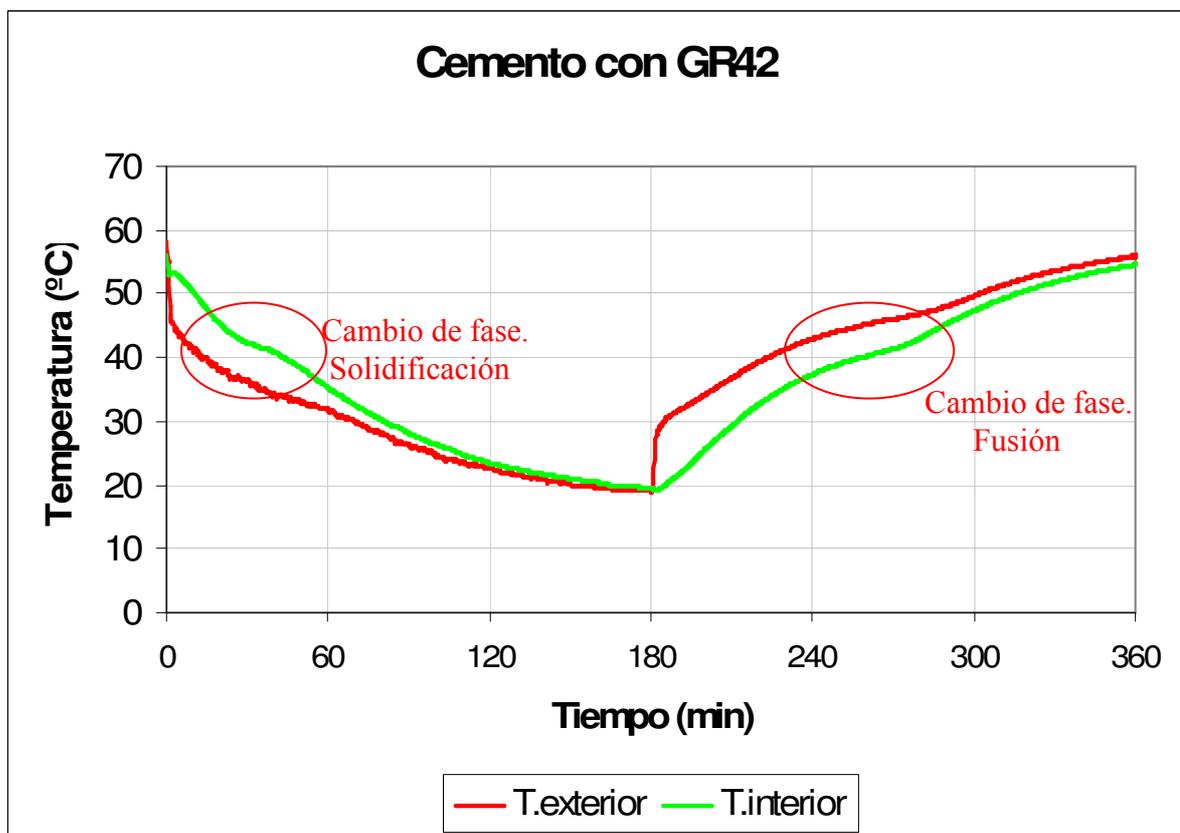
**Tabla 11:** Tabla resumen de las tres placas realizadas con cemento y materiales PCM

**2.4.2 Experimentos a escala de laboratorio.**

Además del termo par que cada placa lleva en su interior, se les coloca otro en la superficie de la placa para registrar las temperaturas superficiales. Ambos empiezan a grabar los datos que luego se obtendrán mediante un software.

En la simulación, ni las temperaturas ni la duración de los procesos se ajusta a la realidad, pero lo que se quiere analizar son los diferentes comportamientos de cada placa con material PCM respecto la placa de cemento solo, sometidas ambas a las mismas condiciones. La toma de datos de todas las simulaciones será cada 10 segundos. Los pasos que se han seguido son los siguientes: Primero permanecen en la estufa alrededor de 24, se comienza a grabar datos en el termopar y controla el tiempo con el cronómetro. Se cambia a temperatura ambiente, donde permanece durante 180 minutos. Pasado este tiempo, se vuelve a la estufa (50°C), para permanecer otros 180 minutos.

En el caso de la placa GR42 su cambio de fase se realiza alrededor de 41°C, por lo que para ver el efecto de manera más visible, para esta placa y para la de cemento (que es con la que se compara) se realiza otra simulación con la estufa a 60°C.

Comportamiento térmico de la placa con PCM 50% GR42 (1-3mm)

**Figura 39:** Temperaturas interiores y exteriores de la placa 50% GR42

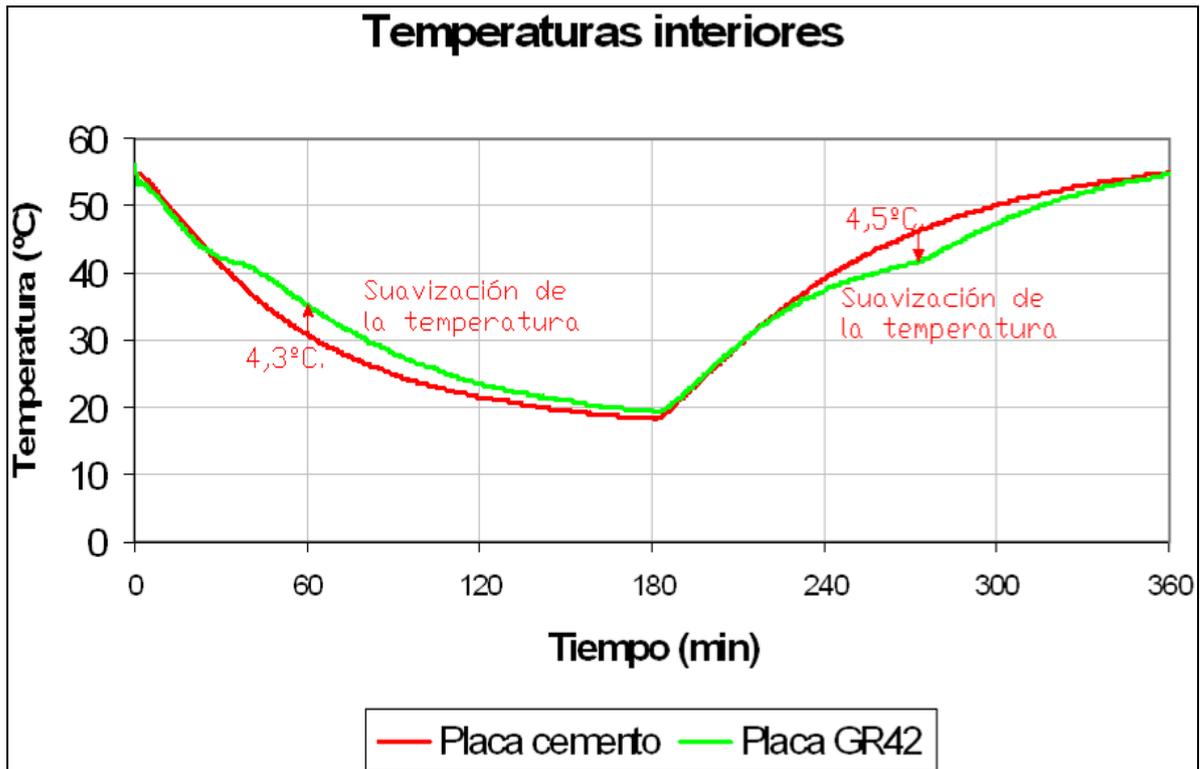


Figura 40: Comparación Tª interiores de la placa de cemento y placa 50% GR42

Comportamiento térmico de la placa con PCM 10% DS 5001X + 10% DS 5008X

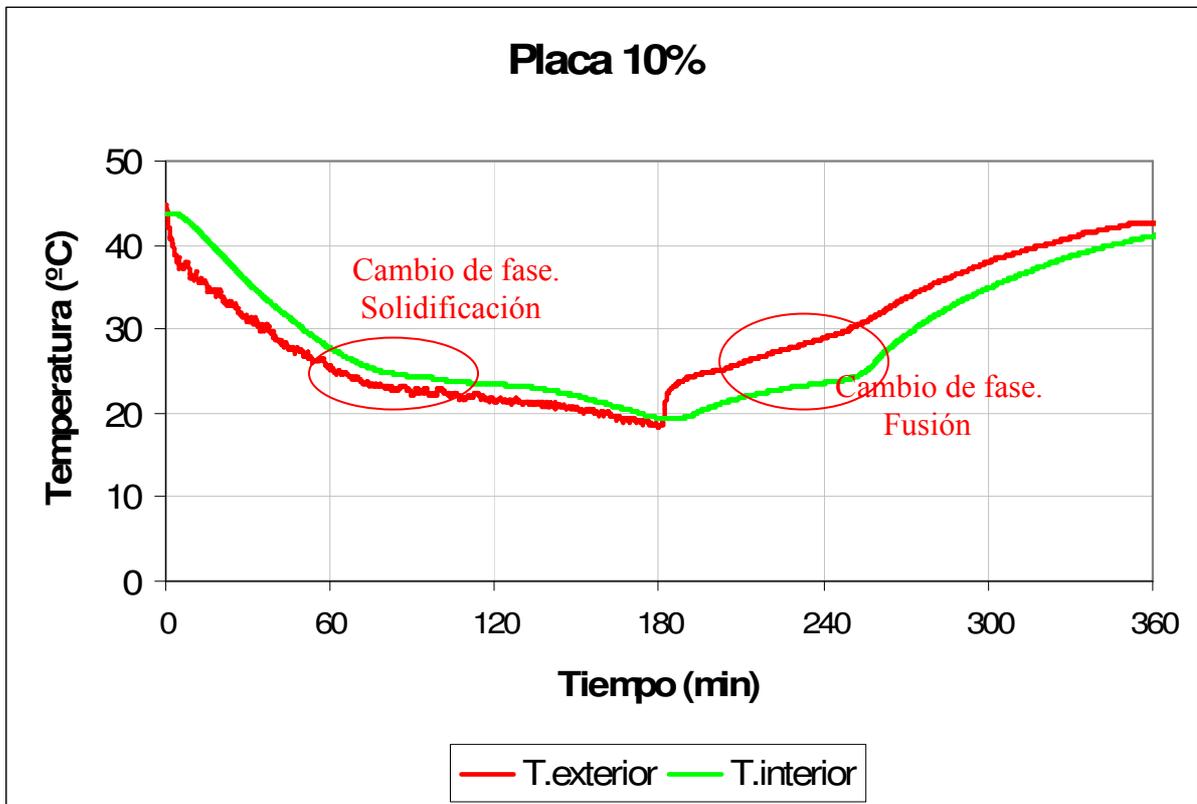
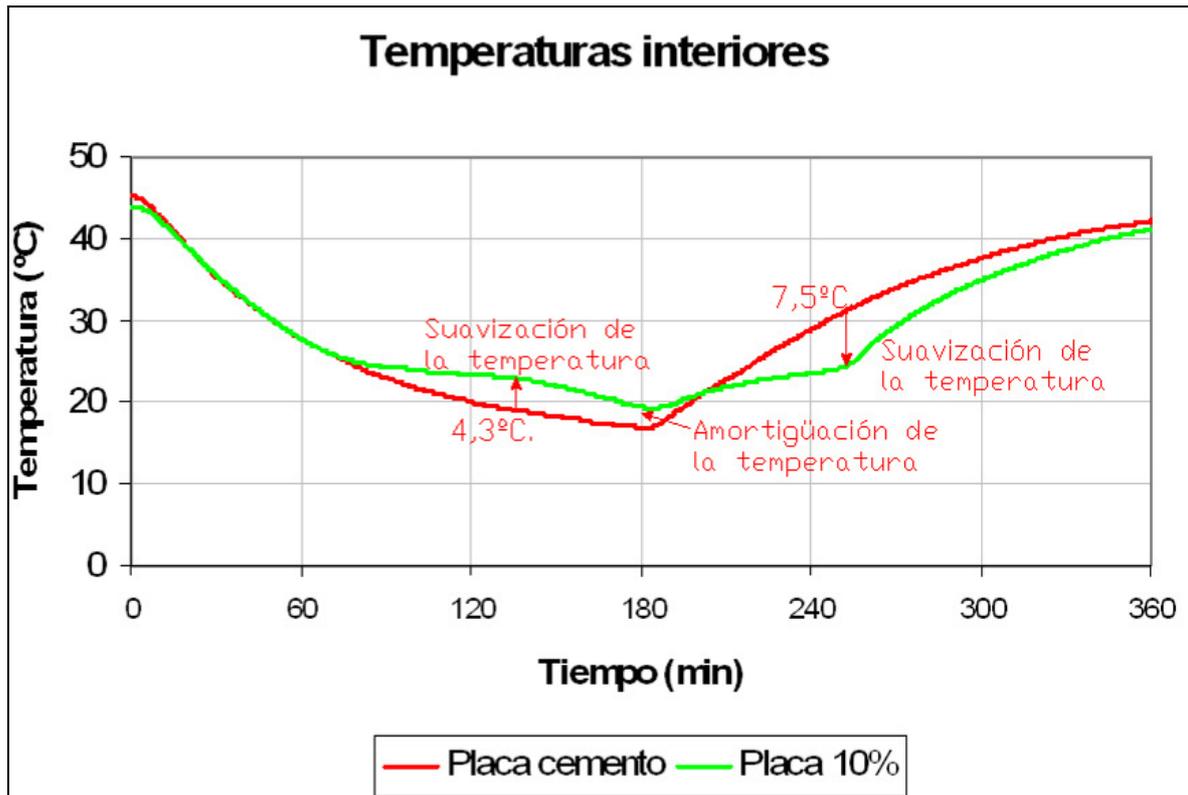


Figura 41: Temperaturas interiores y exteriores de placa 10%DS5001X+10%DS5008X



**Figura 42:** Comparación  $T^a$  interiores de placa cemento y placa 10%DS5001X+10%DS5008X

#### Conclusiones tras el uso de PCM con cementos.

En las gráficas anteriores, se observa cómo la introducción de materiales PCM en la mezcla de cemento influye positivamente. Al igual que los ensayos realizados anteriormente con el yeso, los cambios de fase del PCM llevan asociados una disminución en la velocidad de cambio de la temperatura, tanto en el proceso de subida como de bajada. La diferencia es que son menos pronunciados que en el caso de yeso, ya que la difusividad del cemento es menor.

-En la placa de PCM GR42, alrededor de 41°C (temperatura de cambio de fase), existe un aplanamiento en la gráfica resultado del cambio de fase que ocurre a esa temperatura, provocando la suavización de esta.

-En el caso de la placa con PCM 10% DS 5001X y 10% DS 5008X, alrededor de los 23-21°C, (temperatura de cambio de fase), se produce el aplanamiento de la gráfica, creando que exista alrededor del minuto 90 del calentamiento, una diferencia de temperatura de hasta 7,5°C entre la placa de cemento con PCM y la de cemento solo. Además en esta gráfica en el pico de cambio de procesos, existe una amortiguación de la temperatura de casi 3°C.

Se concluye diciendo, que tras la realización de los ensayos con PCM en cemento, se considera viable su utilización por varios motivos: facilidad de trabajar la mezcla, homogeneidad e influencia térmica positiva de los PCM en las placas de cemento resultantes.

**2.5 Ensayos realizados en muestras de polímeros termoestables con PCM.**

Esta parte del proyecto se destina a realizar ensayos a mezclas de materiales termoestables con los diferentes PCM estudiados anteriormente.

En esta ocasión se decide hacerlo con materiales termoestables, pensando en el uso que tienen estos materiales en elementos exteriores como persianas, parasoles, lamas.. o en el caso de interiores, para suelos flexibles. Las características y propiedades de estos materiales se describen en el ANEXO IV.

**2.5.1 Preparación de probetas de resinas epoxi y de poliéster.**

Lo primero que se hace con las resinas, es ver su homogeneidad y comportamiento al introducirse en la mezcla PCM. Para esto, se hacen moldes de diámetro 7cm, de resina epoxi y de resina de poliéster con PCM DS 5001X y DS 5008X, introduciéndoles un termopar para la recogida de datos térmicos.

<b>Tipo de resina</b>	Epoxi
<b>%Material cambio de fase</b>	5%
<b>Tipo de PCM</b>	DS 5001X, DS 5008X
<b>Materiales</b>	<b>Cantidad (gr)</b>
Material base	116
Catalizador	3.55
PCM DS 5001X	3.55
PCM DS 5008X	3.55
PCM DS 5008X	10



Epoxi + 2,5% DS 5001X + 2,5% DS 5008X

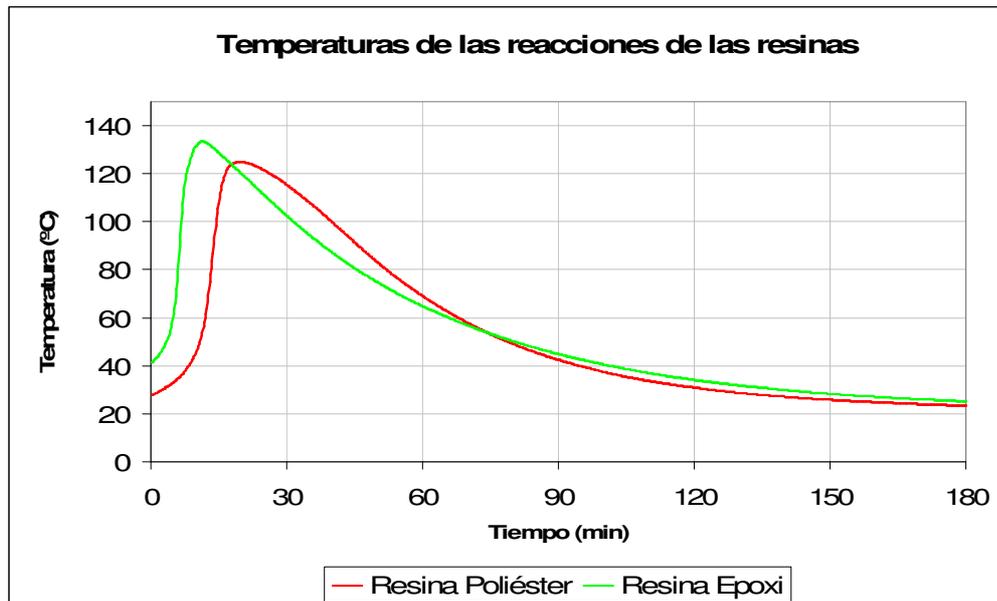
<b>Tipo de resina</b>	Poliéster
<b>%Material cambio de fase</b>	20%
<b>Tipo de PCM</b>	DS 5001X, DS 5008X
<b>Materiales</b>	<b>Cantidad (gr)</b>
Material base	100,6
Catalizador	2
PCM DS 5001X	10
PCM DS 5008X	10



Poliéster + 20% DS 5001X + 20% DS 5008X

**Tabla 12:** Tabla resumen de la pieza de resina epoxi y de resina de poliéster

Ambas resinas tienen reacciones exotérmicas muy elevadas. Los datos de las temperaturas que alcanzan estas reacciones, se reflejan en la siguiente gráfica:

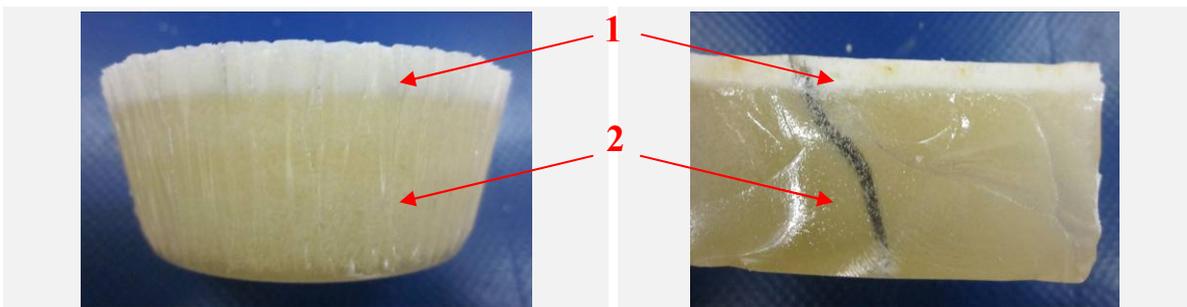


*Figura 43:* Temperaturas que alcanzan las reacciones de las resinas.

Para ambos casos, se observa que las reacciones pasan de 120°C. Este dato es importante ya que a esta temperatura se encuentra la temperatura de inflamación de la parafina

Para analizar la homogeneidad de las mezclas, se parten las piezas realizadas en el punto anterior y se observan con la lupa de diez aumentos.

### RESINA EPOXI



Pieza de resina epoxi con material PCM DS 5001X y DS 5008X

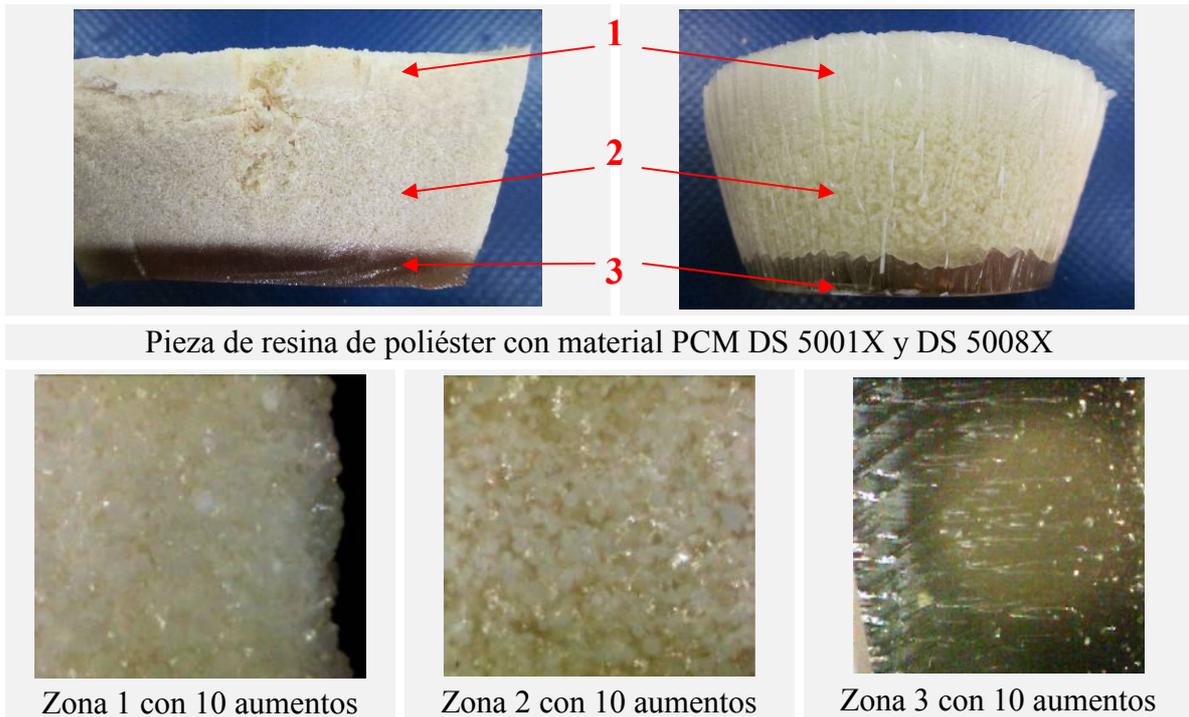


Zona 1 con 10 aumentos



Zona 2 con 10 aumentos

**RESINA DE POLIÉSTER**



**Figura 44:** Tabla resumen de las homogeneidades de la resina epoxi y resina de poliéster

En la mezcla de resina epoxi, la homogeneidad es muy mala. Queda el PCM en la superficie de la pieza (1), y la resina en la parte inferior (2).

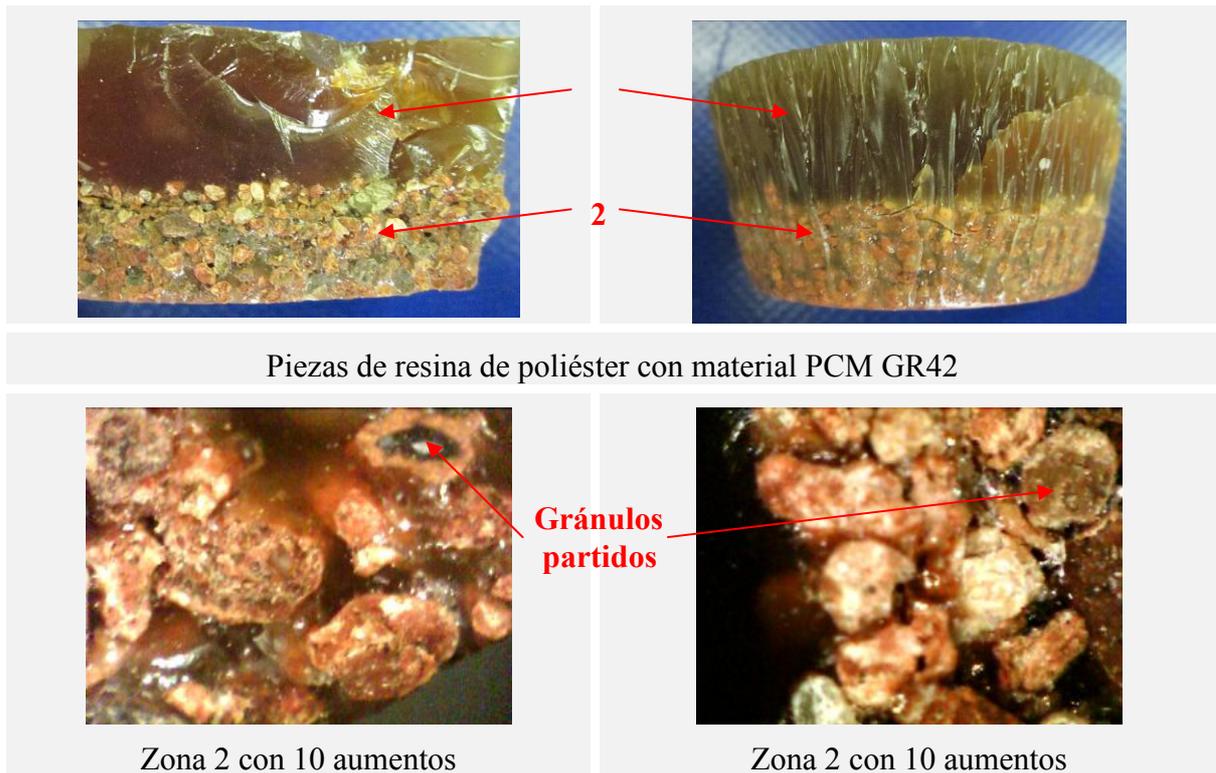
En la resina de poliéster no se distribuye el PCM homogéneamente por toda la pieza. La parte superior (1), tiene una concentración de PCM elevada. A medida que se observan zonas inferiores de la pieza, la concentración disminuye, llegando a ser nula (3).

Aún no siendo homogénea la mezcla de la resina de poliéster, se decide hacer los ensayos con este tipo de resina, ya que los resultados son mejores. Con resina epoxi no se harán ensayos, ni siquiera se prueba la homogeneidad con el material PCM GR42.

<b>Tipo de resina</b>	Poliéster
<b>%Material cambio de fase</b>	25%
<b>Tipo de PCM</b>	GR 42 (1-3mm)
<b>Materiales</b>	<b>Cantidad (gr)</b>
Material base	100
Catalizador	2
GR42 (1-3mm)	25



Poliéster + 25% GR42



**Figura 45:** Tabla resumen de la homogeneidad de la resina de poliéster con PCM GR42

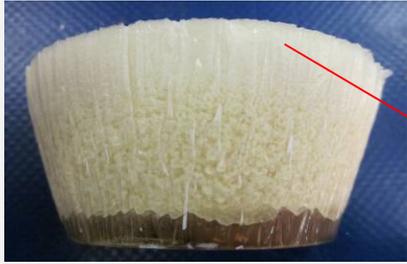
En este caso la homogeneidad es mala, ya que el material PCM ha sedimentado en la pieza, quedando la parte superior de esta, sin ningún gránulo de material PCM GR42.

Lo que si se observa en las fotografías es que existe muy buena unión de la resina con el material PCM GR42, ya que al partir las piezas, los gránulos no saltan de la mezcla sino que se parten. Además, con la lupa de 10 aumentos, se ven unas pequeñas manchas negras. Se piensa que puede ser parafina quemada, por la reacción exotérmica de la resina.

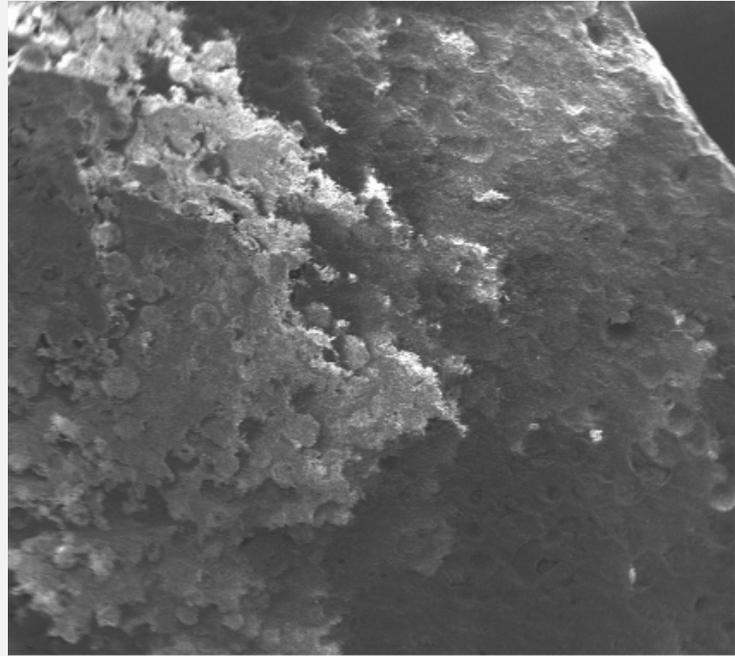
Los siguientes ensayos con polímeros termoestables, sólo se van a realizar con resina de poliéster y no se repetirán con resina epoxi. El motivo, explicado en la página anterior, es que la homogeneidad de la resina epoxi con los PCM es muy mala.

### **2.5.2 Observación de la resina poliéster con PCM en el microscopio electrónico.**

La unión de la resina de poliéster con el material PCM GR42, ha quedado bien definida en el punto anterior, debido al tamaño del gránulo del material PCM. Sin embargo, en el caso de los PCM DS 5001X y DS 5008X, no se ha podido observar bien. Por este motivo, se observa con el microscopio electrónico la unión de la resina de poliéster con material PCM DS 5001X y DS 5008X.

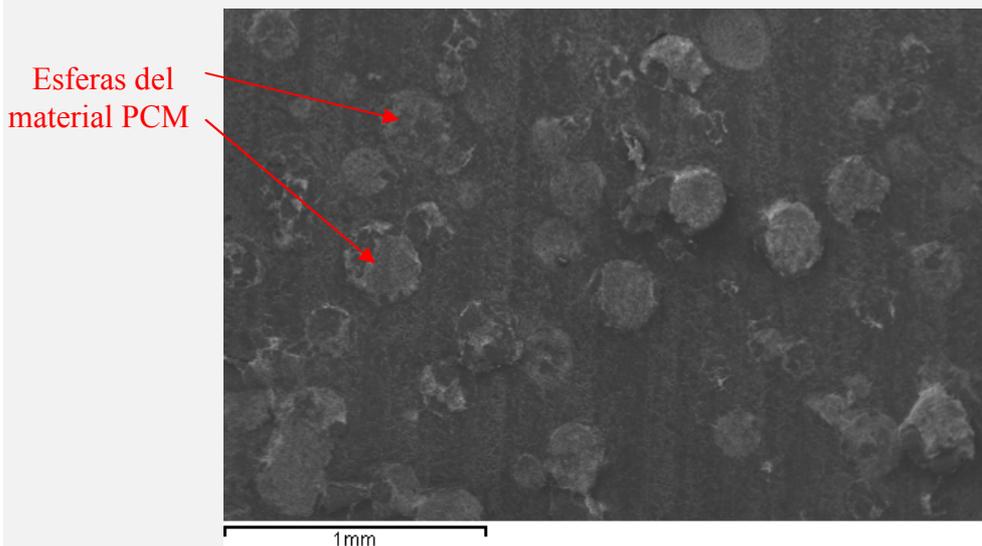


**Fot.23:** Resina poliéster con PCM DS 5001X y DS 5008X



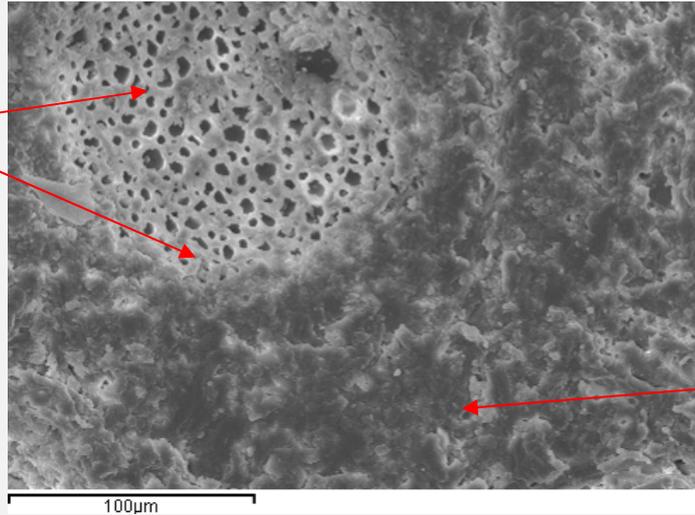
**Fot.24:** Zona de mayor concentración de material PCM

En esta fotografía se observa la gran concentración de PCM que presenta y poca resina.



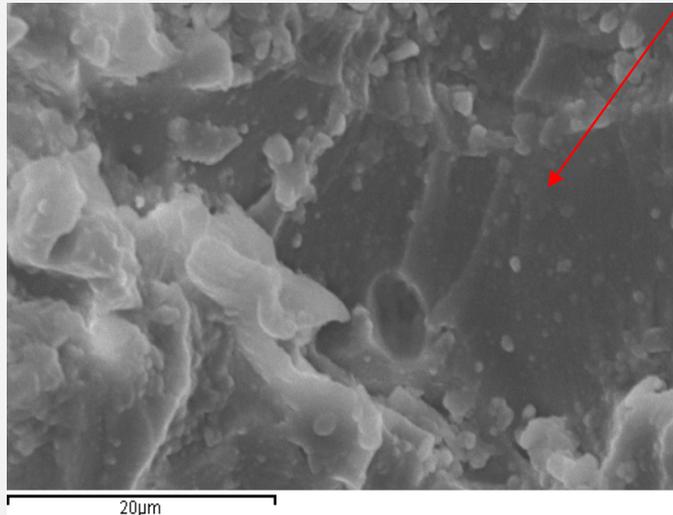
**Fot.25:** Esferas de PCM DS 5001X y DS 5008X dentro de la resina de poliéster

Micro-cápsulas  
que forman la  
esfera del PCM

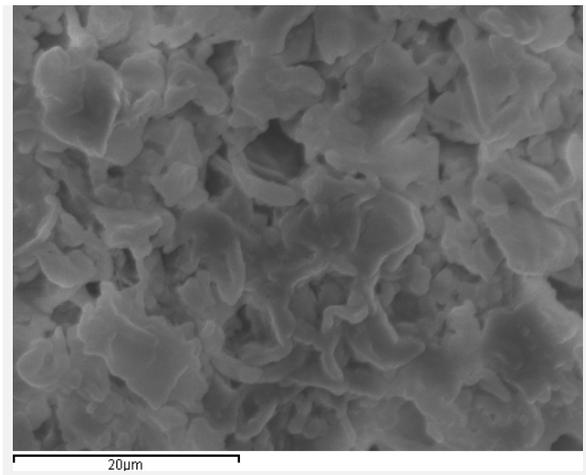
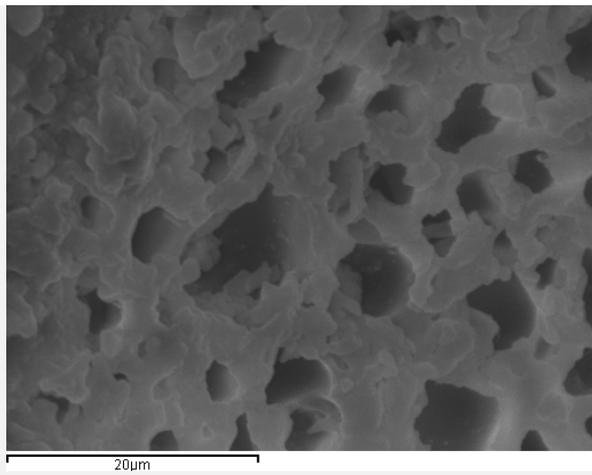


Zona de  
resina

**Fot.26:** Esferas de PCM DS 5001X y DS 5008X dentro de la resina de poliéster



**Fot.27:** Zona de resina



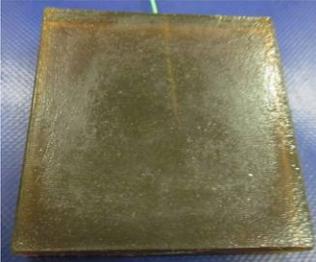
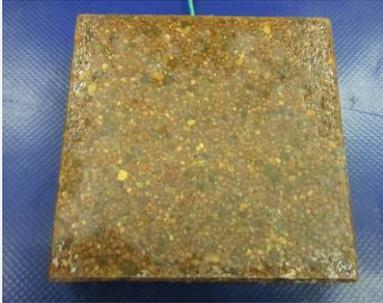
**Fot.28 y 29:** Zona de las micro-cápsulas que forman la esfera del material PCM

En estas fotografías se diferencian claramente las esferas del material PCM DS 5001X y DS 5008X. Incluso en las fotografía 25, se ven las micro cápsulas de las esferas.

La fotografía 26 corresponde a la zona dentro de la muestra observada, que es sólo resina de poliéster. Las fotografías 28 y 29, corresponden a la esfera del material PCM. En ellas se observan micro cápsulas rotas (foto 28) o totalmente deformadas (foto 29).

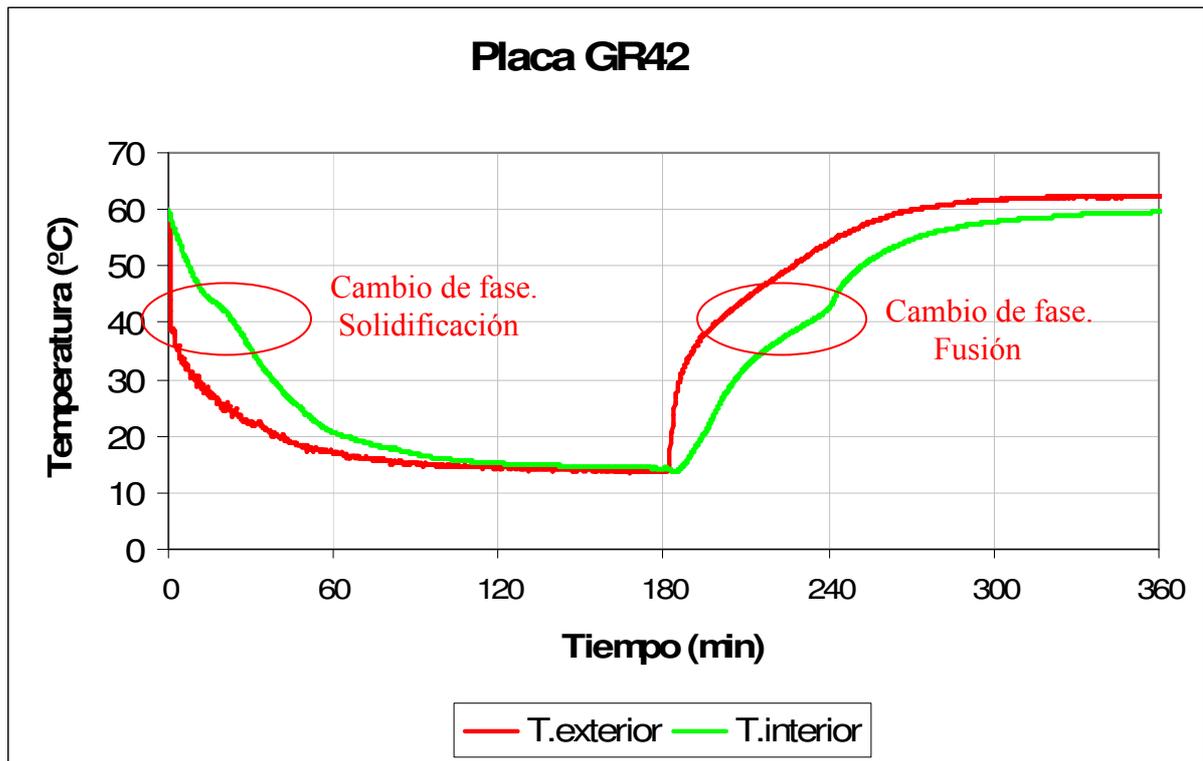
Suponemos que en el momento de reacción exotérmica de la resina, la parafina fundió y el material flexible que la contiene deformó, adaptándose a su forma. Cuando las temperaturas bajaron porque la reacción había terminado, las micro cápsulas no pudieron volver a su forma esférica, porque la resina había endurecido y había ocupado ese volumen. El que existan micro-cápsulas rotas se atribuye a que al crear el vacío para ver las muestras en el microscopio electrónico, el material que las envuelve se rompe.

**2.5.3 Experimentos a escala de laboratorio.**

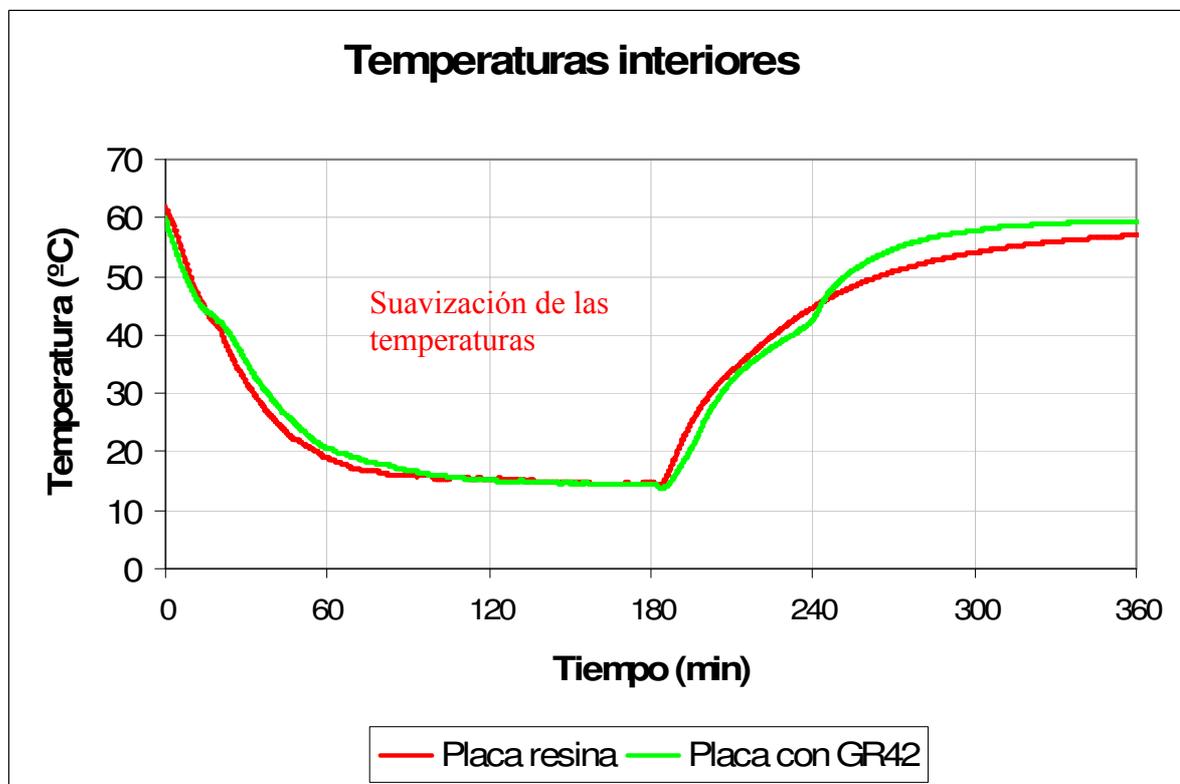
<b>%Material cambio de fase</b>	-	
<b>Materiales</b>	<b>Cantidad (gr)</b>	
Material base	240	
Catalizador	4,8	
<b>%Material cambio de fase</b>	100%	
<b>Tipo de PCM</b>	GR 42	
<b>Materiales</b>	<b>Cantidad (gr)</b>	
Material base	120	
Catalizador	2,4	
GR 42	120	
<b>%Material cambio de fase</b>	20%	
<b>Tipo de PCM</b>	DS 5001X DS 5008X	
<b>Materiales</b>	<b>Cantidad (gr)</b>	
Material base	200	
Catalizador	4	
DS 5001X	20	
DS 5008X	20	

**Tabla 13:** Tabla resumen composición de las probetas y placas de resina con PCM.

Comportamiento térmico de la placa con PCM 100% GR42 (1-3mm)



*Figura 46:* Temperaturas interiores y exteriores de la placa 100% GR42



*Figura 47:* Comparación  $T^a$  interiores de la placa de resina y placa 100% GR42

Comportamiento térmico de la placa con PCM 10%DS 5001X y 10%DS 5008X

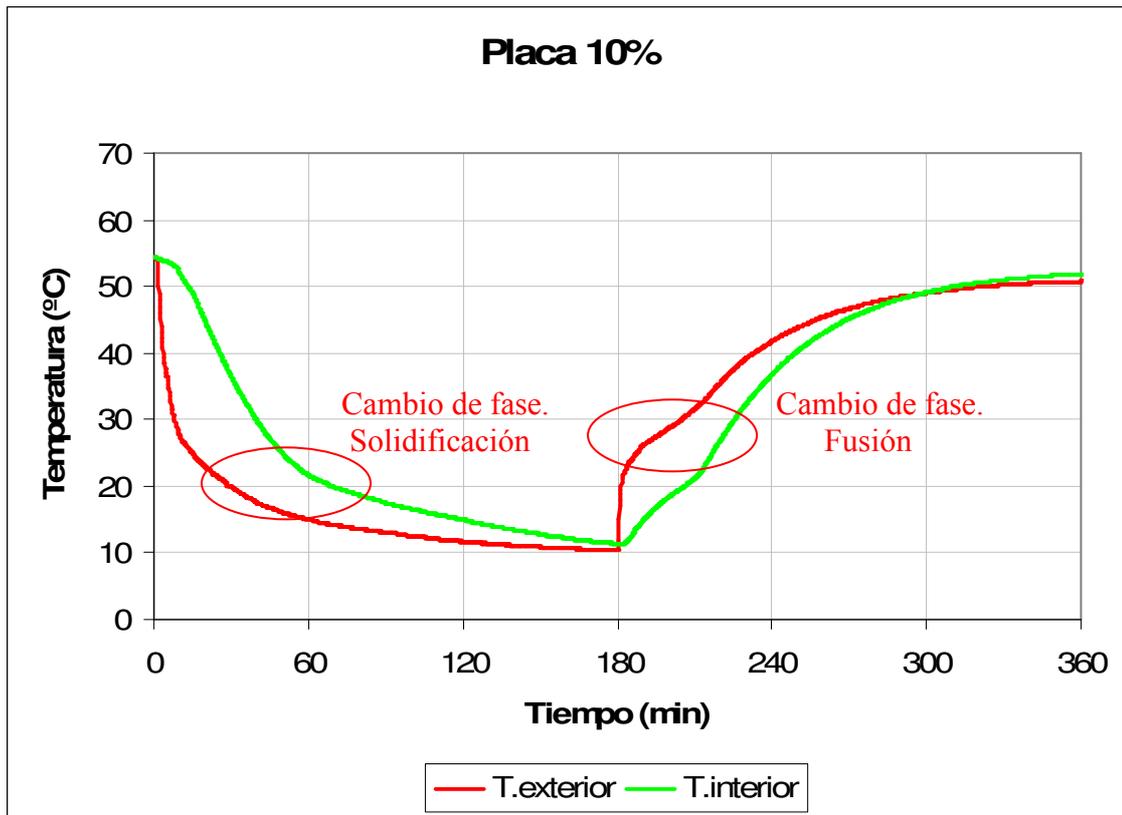


Figura 48: Temperaturas interiores y exteriores de la placa 10%DS5001+10%DS5008

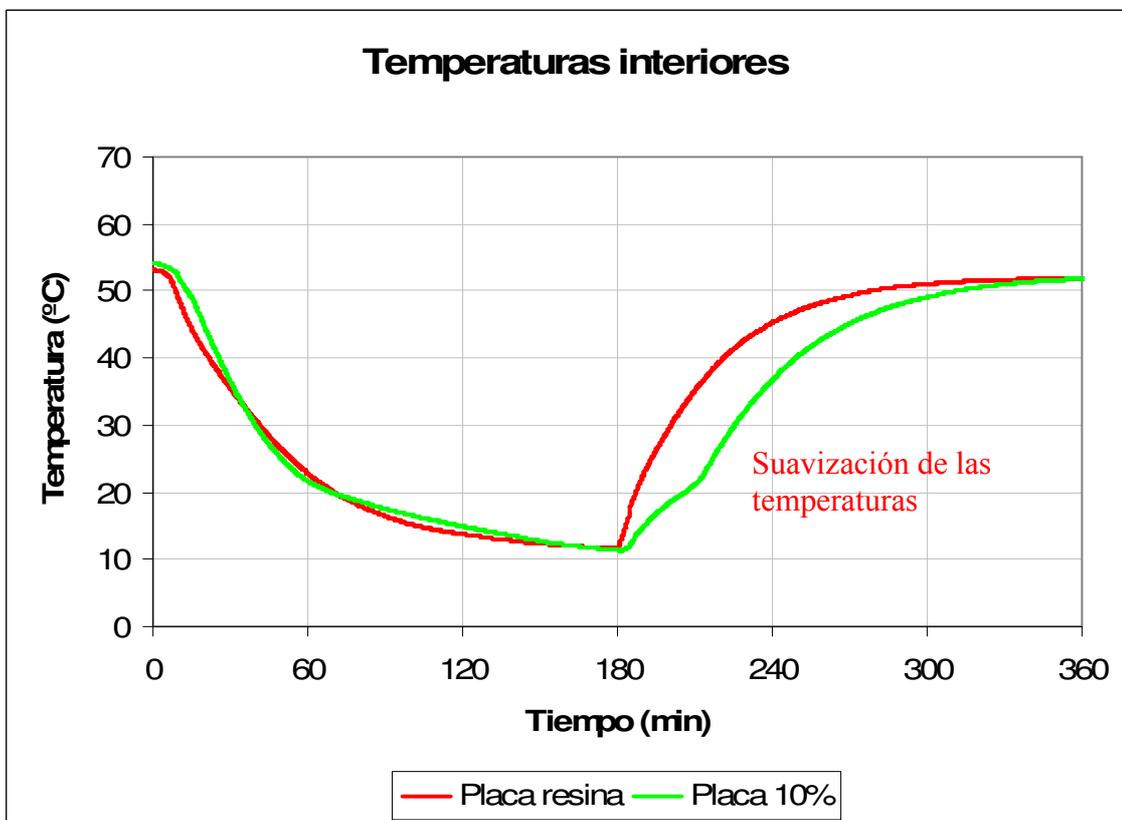


Figura 49: Comparación Tª interiores placa resina y placa 10%DS5001+10%DS5008

Conclusiones tras la usar PCM con materiales termoestables.

En el primer contacto con este tipo de materiales, se observa que la homogeneidad de su mezcla con los materiales PCM no es buena. Las resinas tienen una gran densidad, y por este motivo el PCM no se distribuye bien, quedando mayor concentración en las partes más altas de la pieza creada.

La homogeneidad en las dos resinas utilizadas (poliéster y epoxi) fue mala, pero en el caso de la resina de poliéster fue un poco mejor, por lo que se decidió realizar algunos ensayos con estos materiales.

El siguiente punto a tratar es que las reacciones internas de la resina cuando se mezclan sus componentes, es exotérmica, alcanzando temperaturas que pasan los 120°C. Temperatura que ronda la temperatura de fusión de las parafinas (material PCM utilizado en estos ensayos).

En lo referente a los ensayos térmicos, las placas que se ensayan tienen gran cantidad de material PCM en sus mezclas, por lo que los resultados coinciden con lo esperado. En el proceso de calentamiento el efecto es visible, pero en el de enfriamiento es casi nulo.

Este comportamiento se asocia a la baja difusividad de las resinas o que quizás al alcanzar temperaturas tan altas, el material PCM ha sufrido daños por que su comportamiento en los ciclos térmicos, no es el esperado.

Por estos motivos, y debido a su elevado precio, no se considera viable la utilización de material PCM en materiales termoestables.

### **3. Ensayos realizados en un cubículo a pequeña escala.**

En esta parte del proyecto se pretende simular lo que ocurre en una estancia a pequeña escala, cuyas paredes incorporaran PCM en su composición.

Para hacer este estudio, se han creado dos cajas de yeso de dimensiones 24\*24\*33 cm. La forma de ejecutarlas, las condiciones térmicas a las que se someten en los ensayos y las características que presentan son idénticas, sólo se diferencian en que, una incorpora PCM a la mezcla de yeso y la otra no.

Lo que se pretende es, tras someterlas a ensayos térmicos, analizar los resultados obtenidas de ambas cajas, para ver las ventajas que presenta el uso de PCM en el yeso.

#### **3.1 Preparación de los cubículos de ensayo.**

Para hacer el encofrado se ha utilizado poliestireno expandido “corcho”, cortándolo a las medidas que se necesitaba y uniendo las partes con cinta adhesiva.

El suelo y la tapa tienen grosor de 3cm, las paredes 3,7 cm. Para conseguir el mismo grosor en todas las paredes, se coloca un cubo de cartón en el centro a equidistancia de ellas, y se ha forrado con plástico para que no absorba la humedad de las mezclas.

Lo primero es echar una tongada de la mezcla de 3cm de espesor, para la base de la caja. Cuando ha endurecido un poco, se coloca el cubo de cartón en el centro y se le colocan cuatro pesas para que al verter la mezcla no se mueva.

Se va vertiendo la mezcla con cuidado de no mover el cubo central. Como son cajas de tamaño tan grande, se vierte por tongadas, hasta llegar a la altura deseada. Antes de que endurezcan, se introduce un termopar a la mitad del grosor de una de las paredes.

Se desencofra y se colocan otros tres termopares. Uno pegado en la superficie de la pared interior, otro en la exterior y el último en el centro de la caja. Para que los cables de los termopares no se muevan, se unen a la caja con un poco de mezcla.

Para cerrar la caja y sellar la unión, se hace para cada caja un poco de su mezcla, para utilizar como material sellante. Se deja secar a temperatura ambiente 24 horas, y se introduce en la estufa a 60°C durante otras 24 horas, antes de empezar las simulaciones.



Preparación del encofrado con poliestireno expandido.



Base de la caja



Colocación del termo par



Fraguado de la caja



Caja endurecida



Encofrado de la tapa



Tapa endurecida



Caja desencofrada



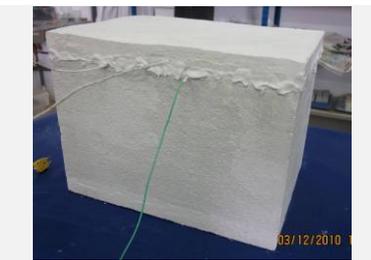
Termo pares en caja yeso



Termo pares caja yeso+PCM



Caja de yeso



Caja de yeso



Superficie caja de yeso



Caja yeso + PCM



Caja yeso + PCM



Superficie caja yeso +PCM

**Tabla 14:** Resumen en fotografías del proceso preparación de las cajas de ensayo.

Los materiales PCM utilizados en el ensayo y los porcentajes que se incluyen en las mezclas se especifican en la siguiente tabla:

Nombre del PCM	Tipo de PCM	Presentación	Tª cambio de fase	Comercial que lo suministra
DS 5001X	Parafina	Micro encapsulado	26°C	Basf
DS 5008X	Parafina	Micro encapsulado	23°C	Basf
GR42 (1-3mm)	Parafina	Ligado a otro material	41°C	Rubitherm

**Tabla 15:** Tipos de PCM utilizados en la caja de ensayo.

Caja	Yeso (%)	DS 5001X (%)	DS 5008X (%)	GR42 (%)	Agua (%)
Caja de yeso	58,80	-	-	-	41,20
Caja de yeso + PCM	37,04	3,7	3,7	18,52	37,04

**Tabla 16:** Composición de las cajas de ensayo.

### **3.2 Observaciones mediante cámara termográfica.**

La observación de las cajas mediante la cámara de infrarrojos tiene doble finalidad:

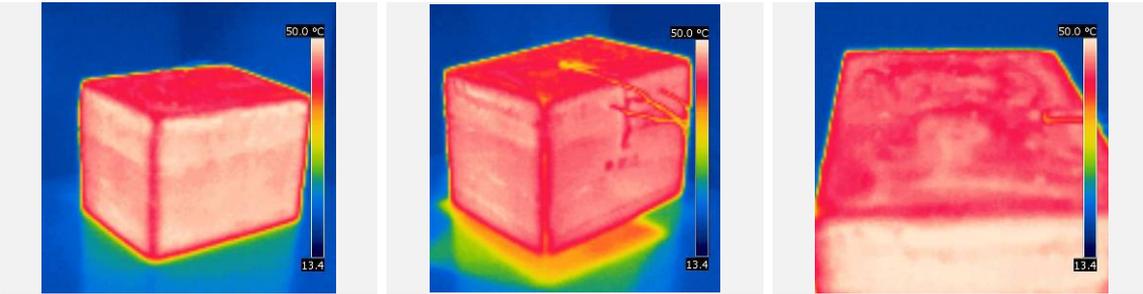
-Por una parte se quiere comprobar la hermeticidad de las cajas y observar los puentes térmicos que existen en ellas. Como los distintos colores indican las temperaturas, donde hay color que indica menor temperatura que el resto de la caja, significa que en ese punto existe una fuga de calor.

-Además se puede observar la velocidad de pérdida de calor de las cajas. Para ello, se fotografian las cajas pasados los mismos minutos desde el momento que se sacan de la estufa a 60°C. En las imágenes se ve como la velocidad de pérdida de calor en el caso de la caja que no contiene PCM en su mezcla, es mucho mayor.

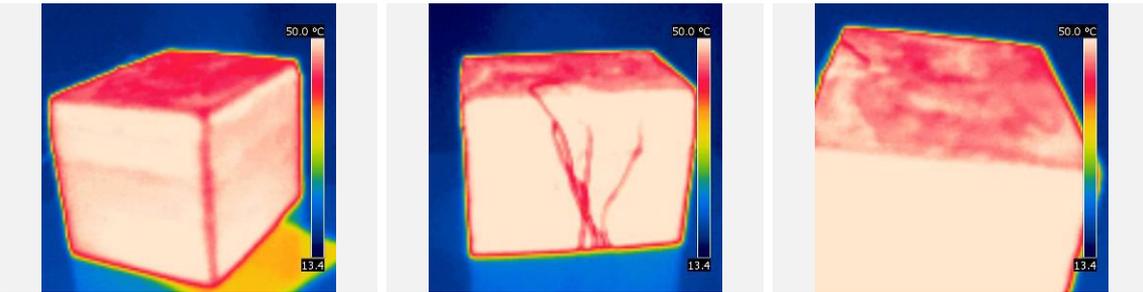
De todos los instantes de los que se han tomado fotografías de las cajas, destacar las de pasados 60 minutos, ya que existe la mayor diferencia entre ambas. Como se puede ver en la escala de colores la temperatura que tienen en ese momento, es muy diferente. Esto es debido a que la temperatura ronda el cambio de fase de parte del PCM (del DS 5001X y del DS 5008X), y por lo tanto, esta cediendo calor almacenado que obtuvo en el proceso de calentamiento de la caja, provocando así, una minoración en la velocidad de enfriamiento.

**Recién sacadas de la estufa**

Caja de yeso

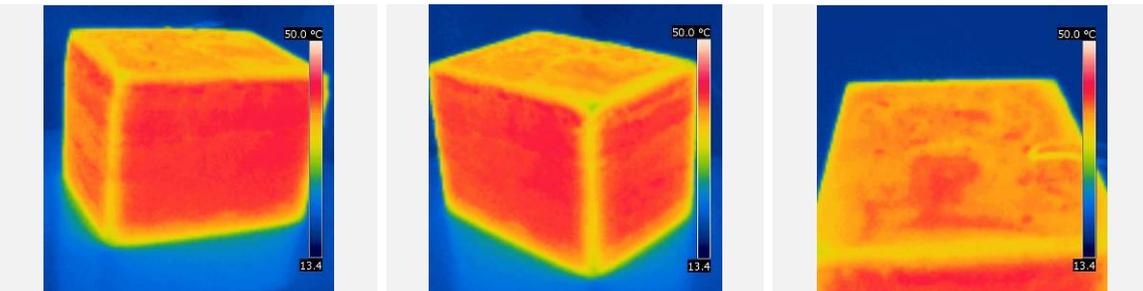


Caja de yeso + PCM

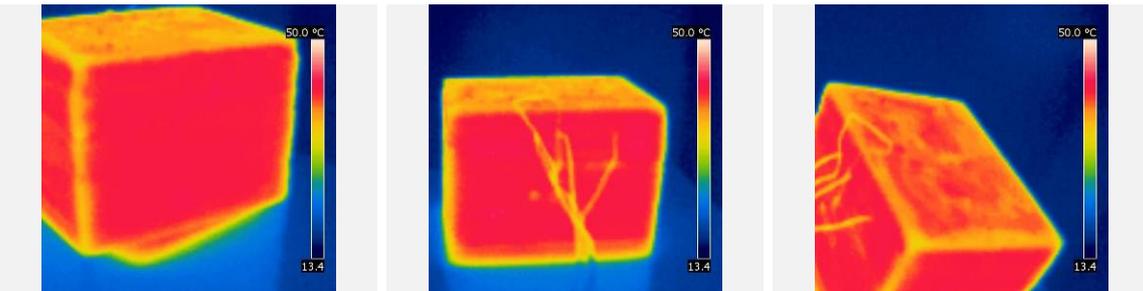


**Pasados 15 minutos.**

Caja de yeso

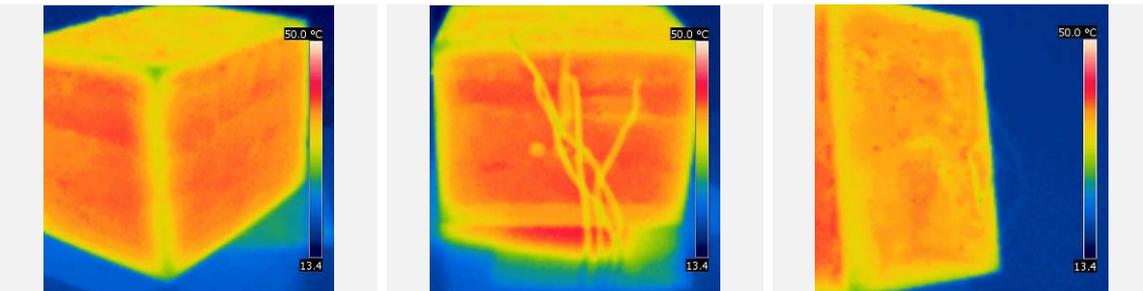


Caja de yeso + PCM

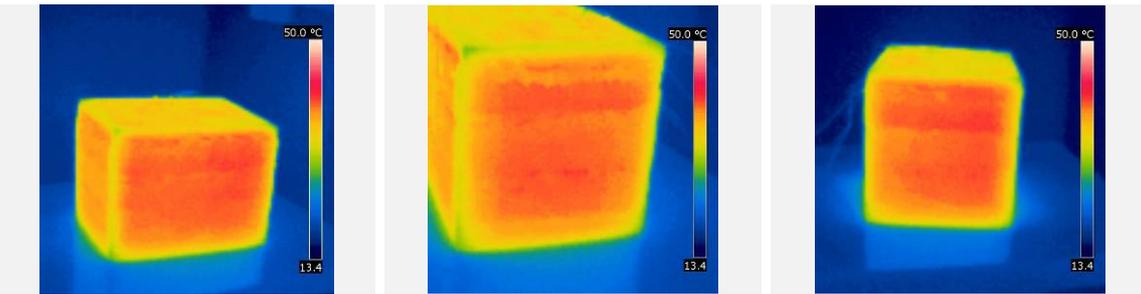


**Pasados 30 minutos**

Caja de yeso

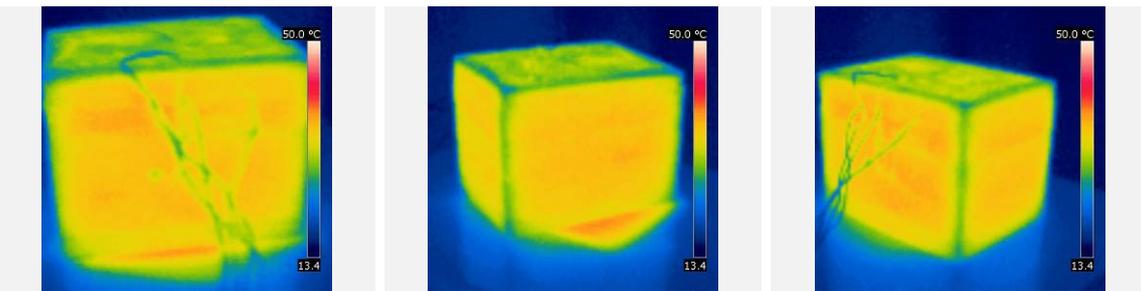


Caja de yeso + PCM

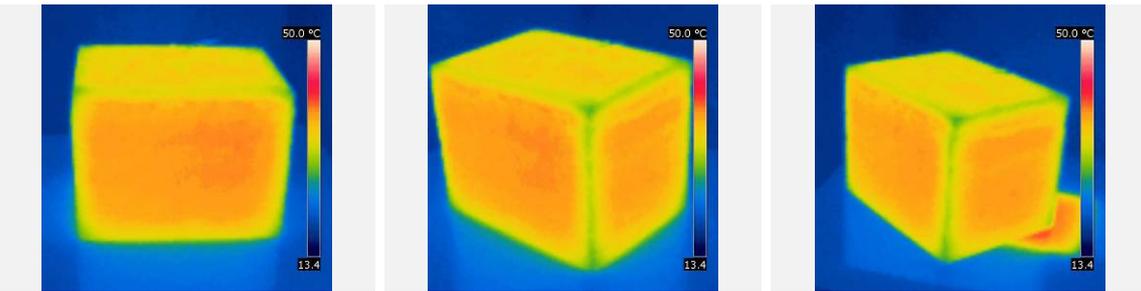


Pasados 45 minutos

Caja de yeso

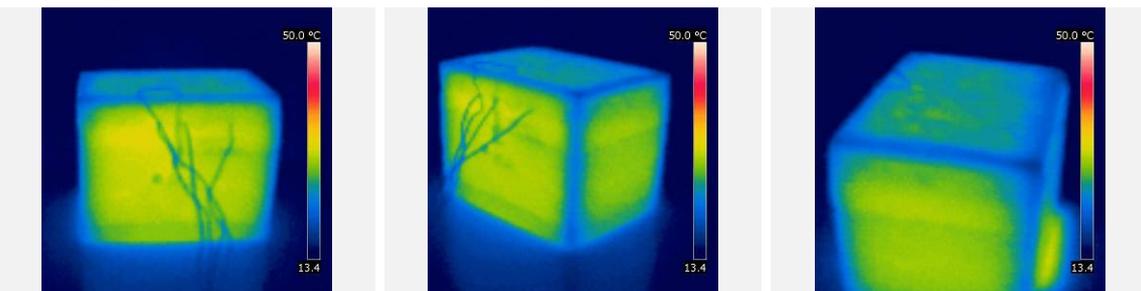


Caja de yeso + PCM



Pasados 60 minutos

Caja de yeso



Caja de yeso + PCM

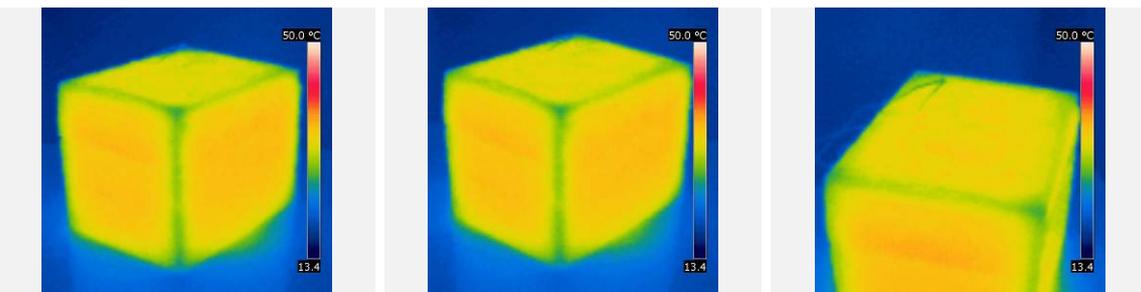


Tabla 17: Resumen fotografías con cámara infrarrojos para ver velocidad pérdida de calor

### **3.3 Procedimiento experimental.**

Antes de comenzar las simulaciones, las cajas han permanecido 24 horas en la estufa a 60°C, por lo que los cuatro termopares rondan esa temperatura.

Se empieza a cronometrar cuando la caja aún permanece en la estufa (un minuto). Pasado este tiempo, se saca la caja y se expone a temperatura ambiente exterior. Para conseguir esto, se coloca junto a la ventana abierta en el laboratorio de fuego.

Junto a la ventana permanece 300 minutos para que baje la temperatura cerca de los 20°C, luego se mete en la estufa a 60°C durante otros 300 minutos.

Por el tamaño que tienen, no se puede hacer la simulación de las dos cajas a la vez, porque no caben en la estufa. Por lo que para que sean las temperaturas ambientales lo más parecidas posibles, se ponen a la misma hora, y se controla la temperatura ambiente con otro termopar. Se han realizado varias simulaciones y se coge para el estudio, dos días con temperatura ambiente lo más parecida posible.



**3.4 Análisis de resultados.**

Los cuatro termo pares colocados en las cajas han recogido datos cada 10 segundos. Estos resultados se han representado en las siguientes gráficas.

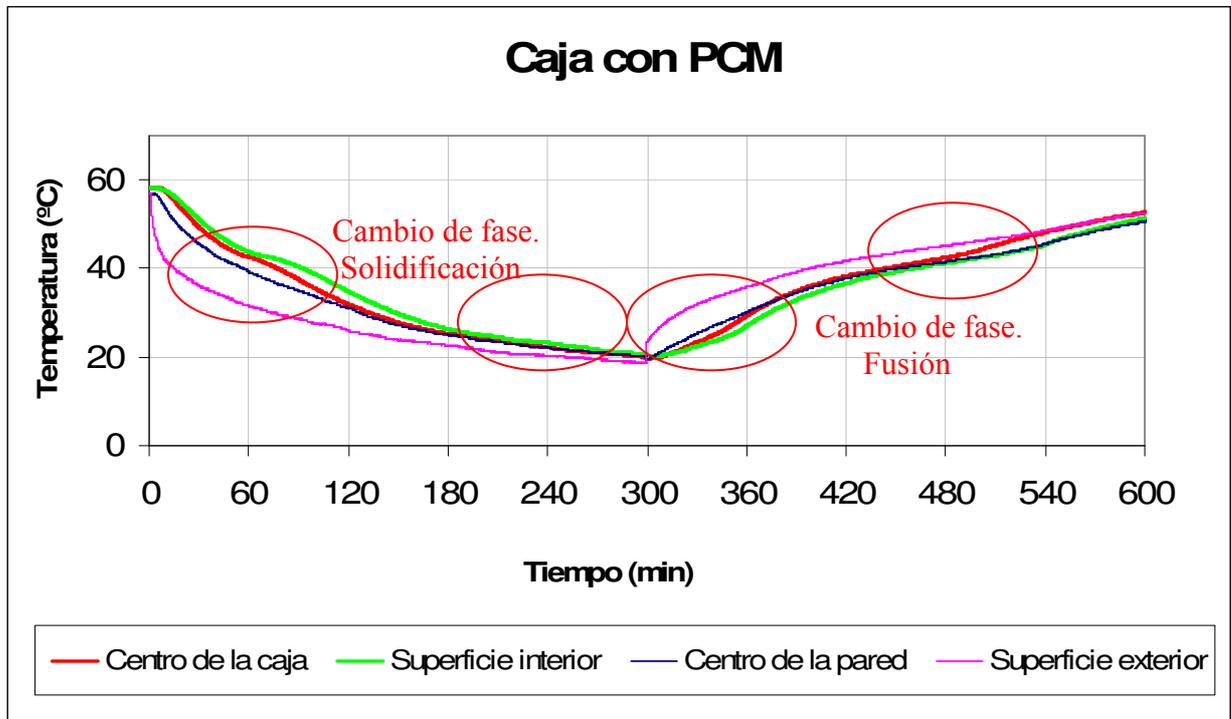


Figura 50: Temperaturas tomadas de los cuatro termo pares en la caja de yeso + PCM.

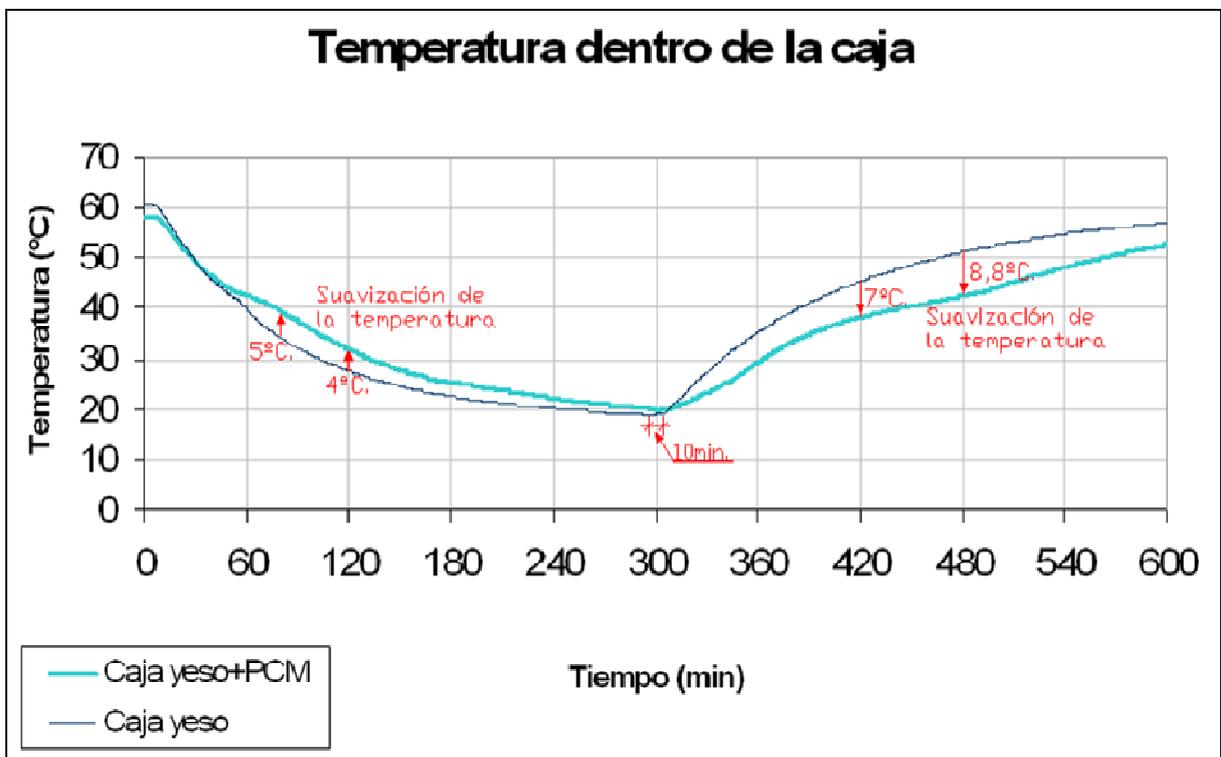
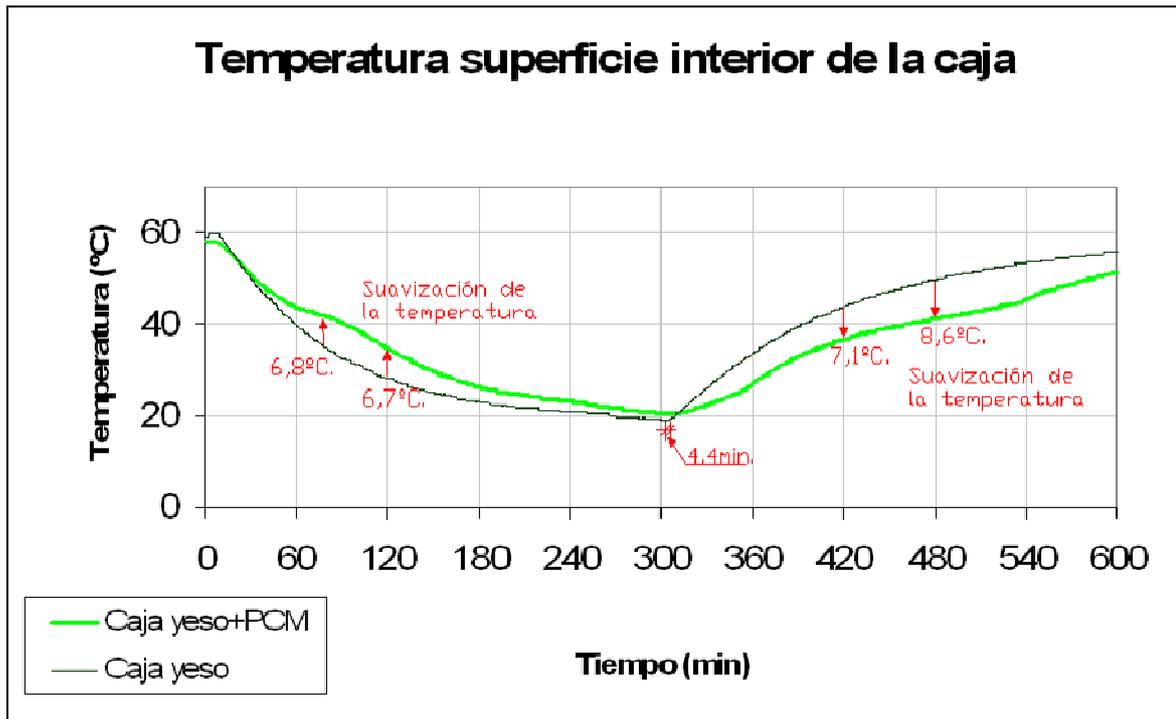
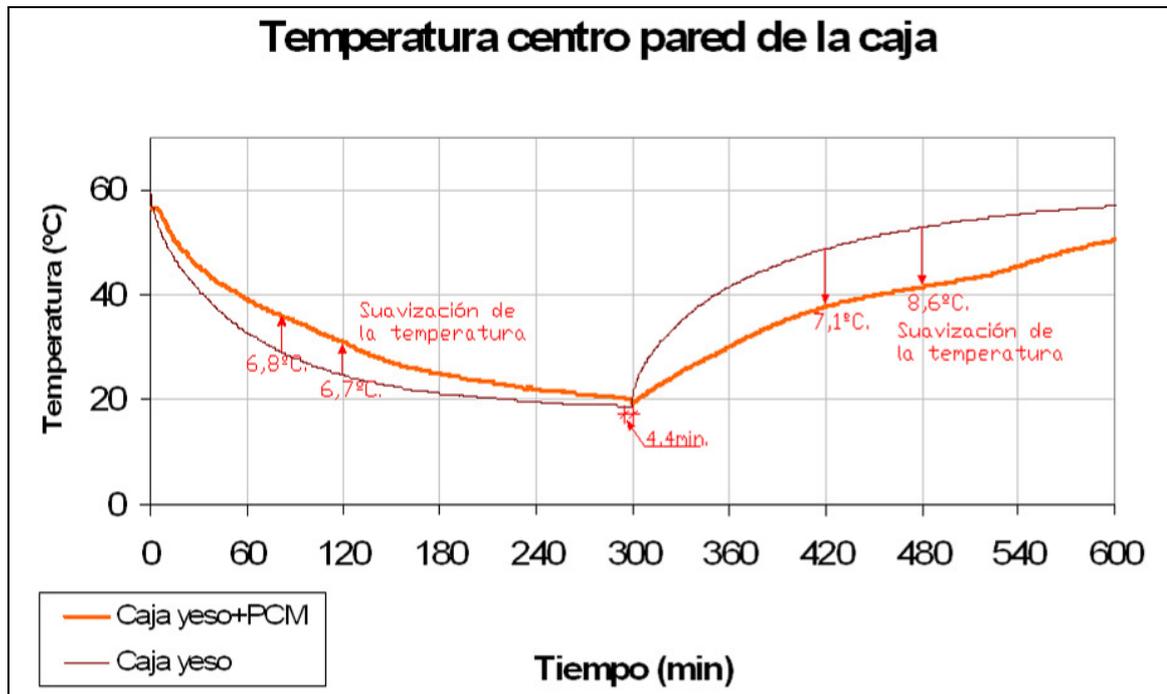


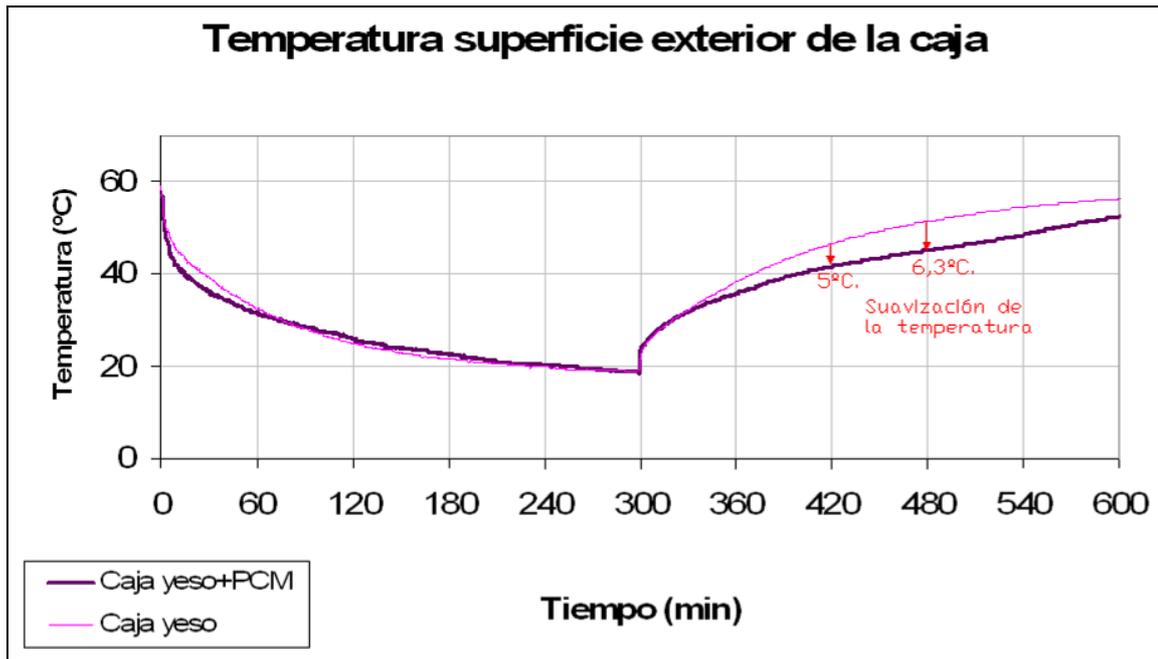
Figura 51: Comparación Tª dentro de la caja, para la caja de yeso y la caja yeso + PCM



**Figura 52:** Comparación  $T^a$  superficial interior, para caja de yeso y la caja yeso+PCM



**Figura 53:** Comparación  $T^a$  centro de la pared, para caja de yeso y la caja yeso+ PCM



**Figura 54:** Comparación  $T^a$  centro de la pared, para caja de yeso y la caja yeso+ PCM

### Conclusiones.

La integración de PCM en el yeso ha tenido una influencia térmica positiva en la caja. Se observa que en el caso de caja con PCM, aún antes de llegar al rango de cambio de fase, la velocidad de cambio de temperatura es menor, tanto en el proceso de subida como de bajada. En la caja sin PCM, en cambio, no existe ningún efecto similar. Esto se debe a la menor difusividad térmica del material con PCM. (Difusividad de mezclas en Tabla 8. Capítulo 2).

Esta parada en el descenso y posterior aumento de la temperatura se produce porque, durante el cambio de fase, buena parte del calor que se absorbe en la caja se lo hace en forma de calor latente para producir el mencionado cambio de fase. Esto se traduce en un gran aumento de la capacidad calorífica efectiva de la caja durante el proceso y, por tanto, un aumento de la inercia térmica.

De los datos obtenidos de los cuatro termopares, se observa mayor diferencia en el caso del termopar introducido en el centro de la pared (Ver figura 49). Esto puede ser debido a que este se encuentra dentro de la masa con PCM, y los demás se pueden ver afectados por la convección del aire.

Sin en lugar de una caja, pasamos estos resultados a una vivienda, esta tendría los siguientes beneficios:

- Amortiguación de la amplitud de oscilación diaria de la temperatura, tanto en máximos como en mínimos.

## **78 Análisis de la viabilidad de usar materiales con PCM en edificación**

-Desfase temporal en los valores de temperatura respecto a los que presentaría una vivienda sin PCM.

Estos dos efectos son positivos de cara a un mayor confort térmico interior. En el caso de la amortiguación es evidente, debido a que la temperatura de las paredes no aumentaría tanto. Pero también lo es el retraso de los valores de la temperatura, ya que el máximo o mínimo, de temperatura se retrasa y cuando tiene lugar, los valores exteriores han cambiado.

Por lo que se concluye diciendo que este ensayo, indica una mejora en el confort térmico por la reducción media de los datos obtenidos de las temperaturas.

#### **4. Simulaciones numéricas del comportamiento térmico de yeso con PCM.**

A fin de reproducir el comportamiento térmico de materiales que contienen PCM, hemos desarrollado un programa de simulación en FORTRAN.

A partir de los ensayos realizados en el punto 2 del presente proyecto, se han obtenido los comportamientos y propiedades térmicas de los PCM y de mezclas con diferentes materiales de construcción. Con estos datos, se ha validado la aplicación informática. Posteriormente, se ha utilizado para obtener los comportamientos térmicos de “cerramientos ficticios” formados por diferentes combinaciones de yeso con PCM.

En estas simulaciones se pueden variar el número y tipos de capas que crean el cerramiento; los porcentajes y tipos de PCM utilizados en cada una de ellas; así como las temperaturas a las que están expuestos.

Para simplificar el modelo matemático, se han realizado las siguientes suposiciones:

1. Los compuestos de yeso con PCM se tratan como un cuerpo uniforme, con las propiedades físicas y térmicas equivalentes, como el calor específico, la densidad y conductividad térmica.
2. El proceso de transferencia de calor a través de las piezas de yeso con PCM, se considera mediante un modelo unidimensional sencillo.
3. Sólo se consideran las temperaturas experimentales de la superficie, sin tener en cuenta los procesos de convección y radiación.

##### **4.1 Modelo matemático utilizado en el programa informático.**

En ausencia de PCM, para cada capa que forma una pared, la ecuación de difusión del calor es:

$$\rho \times C_e \times \frac{dT}{dt} = \lambda \times \frac{d^2T}{dx^2} \quad (4.1)$$

Donde:

$\rho$ : densidad

$C_e$ : calor específico del material

$dT/dt$ : derivada de la temperatura frente el tiempo

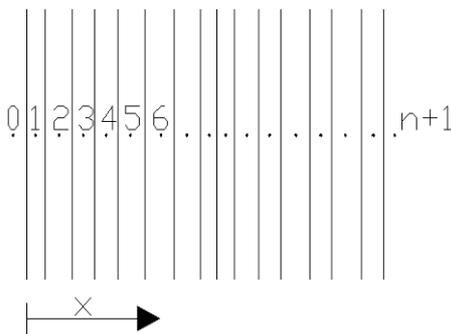
$\lambda$ : conductividad térmica

$d^2T/dx^2$  : segunda derivada de la temperatura frente la posición.

En muchos casos, puede considerarse que los valores de  $\rho$ ,  $C_e$ ,  $\lambda$ , no dependen de la Temperatura, sino que son propios del material y son siempre iguales a lo largo del tiempo y de la posición.

El valor de  $\lambda/(\rho \times C_e)$  se llama Difusividad térmica y se simboliza con  $\alpha$ . Sustituyendo en la ecuación anterior, esta resulta de la siguiente manera:

$$\frac{dT}{dt} = \alpha \times \frac{d^2T}{dx^2} \quad (4.2)$$



La ecuación de difusión del calor se puede discretizar de la siguiente manera:

$$\frac{T_i(t + \Delta t) - T_i(t)}{\Delta t} = \frac{\alpha \times [T_{i+1}(t) + T_{i-1}(t) - 2T_i(t)]}{\Delta x^2} \quad (4.3)$$

$$T_i(t + \Delta t) = T_i(t) + \frac{\alpha \times \Delta t}{\Delta x^2} \times [T_{i+1}(t) + T_{i-1}(t) - 2T_i(t)] \quad (4.4)$$

Donde  $i$  se refiere a cada uno de los  $n$  elementos en que se divide la pared.

Cuando se utilizan materiales con cambio de fase, hay que introducir el calor involucrado en dichos cambios en función de la temperatura.

Para ello, se introduce el calor específico efectivo que tiene en cuenta los dos efectos: calor sensible y calor latente. El calor específico sensible ( $C_e$ ), es la cantidad de calor necesario para aumentar  $1^\circ\text{C}$  un gramo de una sustancia.

Cuando se está produciendo un cambio de fase de fusión, para poder aumentar un gramo de esta sustancia en  $1^\circ\text{C}$ , hay que suministrar mucha más cantidad de calor. Esta cantidad “extra” que se ha de suministrar al material, es la llamada entalpía de fusión.

El calor específico efectivo se puede escribir como  $C_e + E.\text{extra}$ .

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\lambda \times C_e}{(C_e \times \rho) \times (C_e + E_{\text{extra}})} \times \frac{d^2T}{dx^2} \quad (4.5)$$

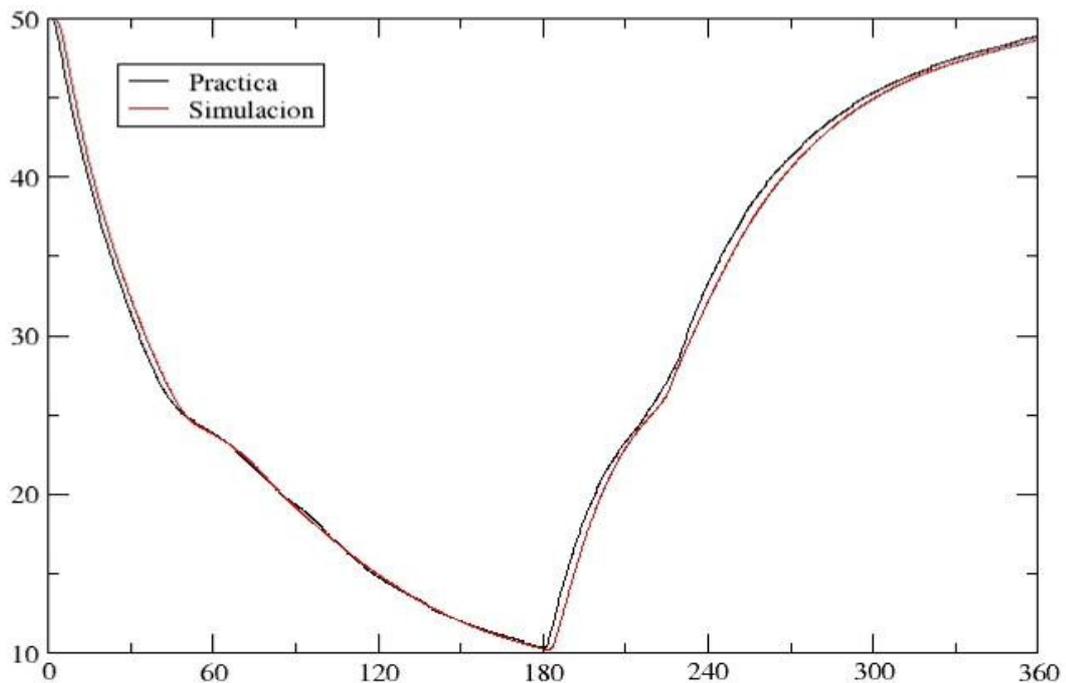
Esta ecuación se puede discretizar de manera análoga a la (4.4). El término  $E.\text{extra}$ , se obtiene del análisis de DSC de PCM, concretamente de las figuras 19, 20, 21 del cap. 2

#### **4.2 Comprobación de la fiabilidad del programa creado.**

Se ha elaborado un programa con lenguaje Fortran que resuelve la ecuación 4.4. Los parámetros ( $\rho$ ,  $C_e$ ,  $\lambda$ ) necesarios para resolver esta ecuación se han obtenido anteriormente en el laboratorio mediante los ensayos realizados a pequeña escala. Además, se han utilizado los parámetros  $\Delta t = 1s$ ; y  $\Delta x = 1mm$ .

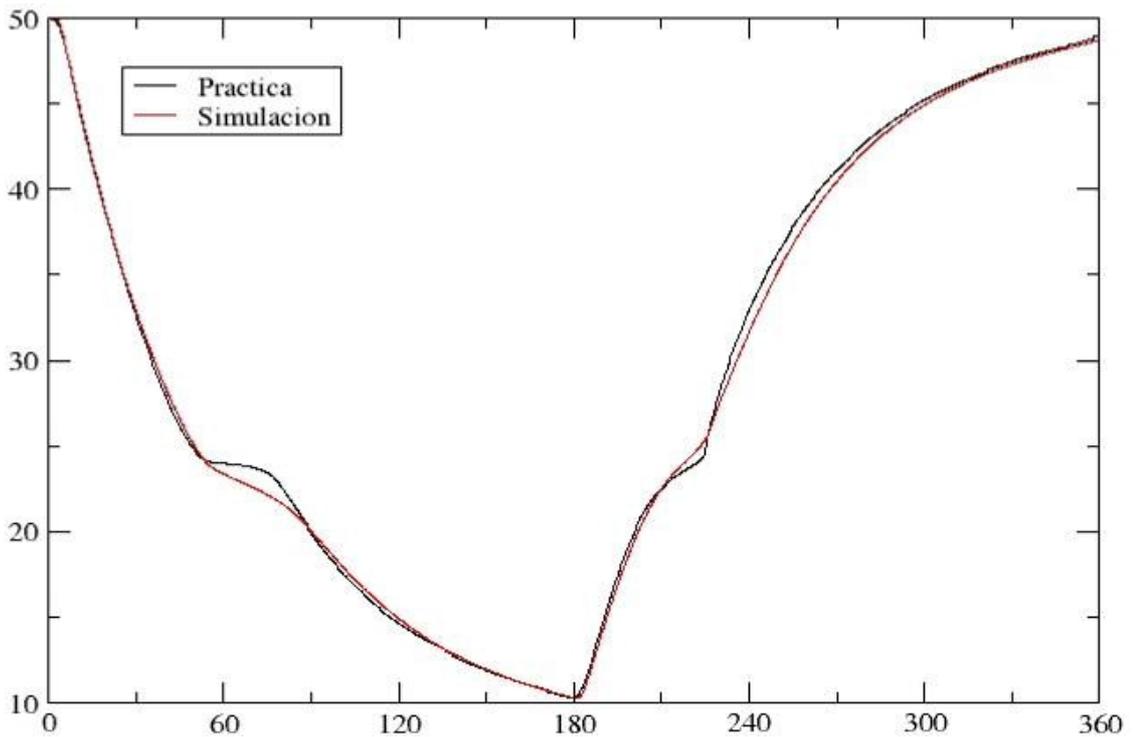
Para comprobar la fiabilidad del programa, se realizan simulaciones con las mismas condiciones que las placas de yeso con PCM ensayadas en el laboratorio. Con esto se pretende observar lo que se asemeja la simulaciones creadas, al comportamiento real de las mezclas de yeso con PCM.

##### **4.2.1. Placa de yeso con 10% de PCM DS 5001X.**



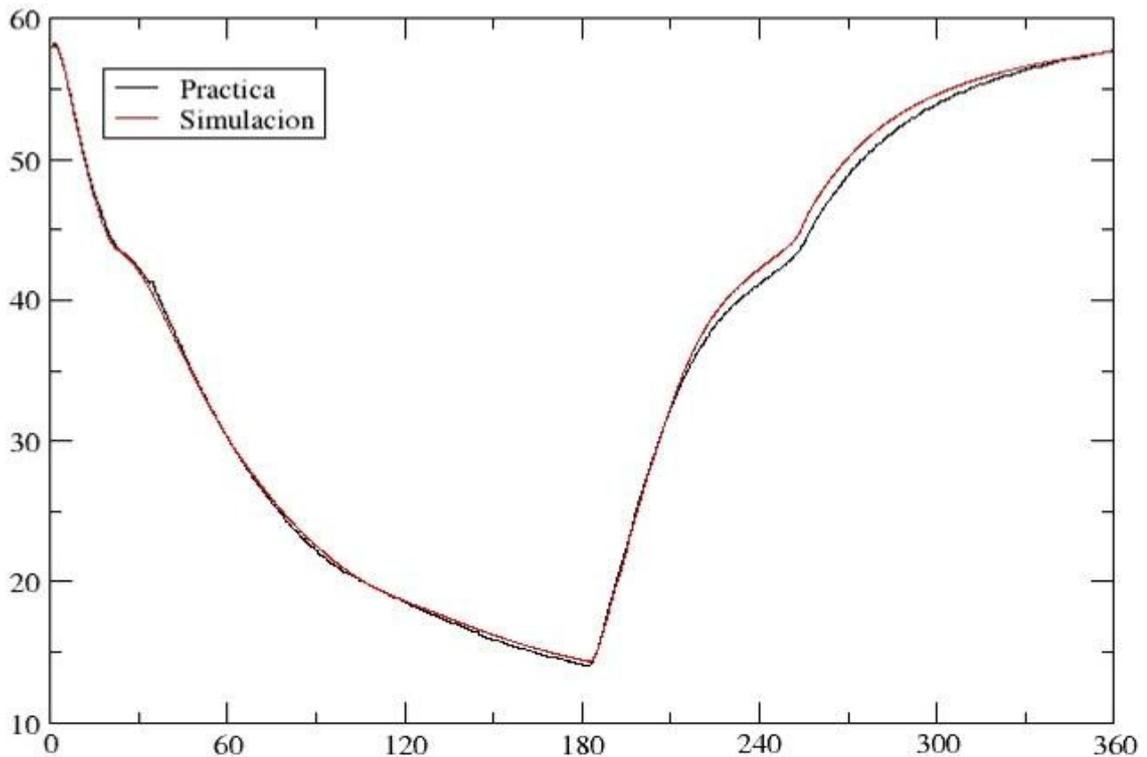
**Figura 55:** Comparación del comportamiento térmico de la práctica y de la simulación, para la placa de yeso con 10% de PCM DS 5001X.

4.2.2. Placa de yeso con 10% de PCM DS 5008X.



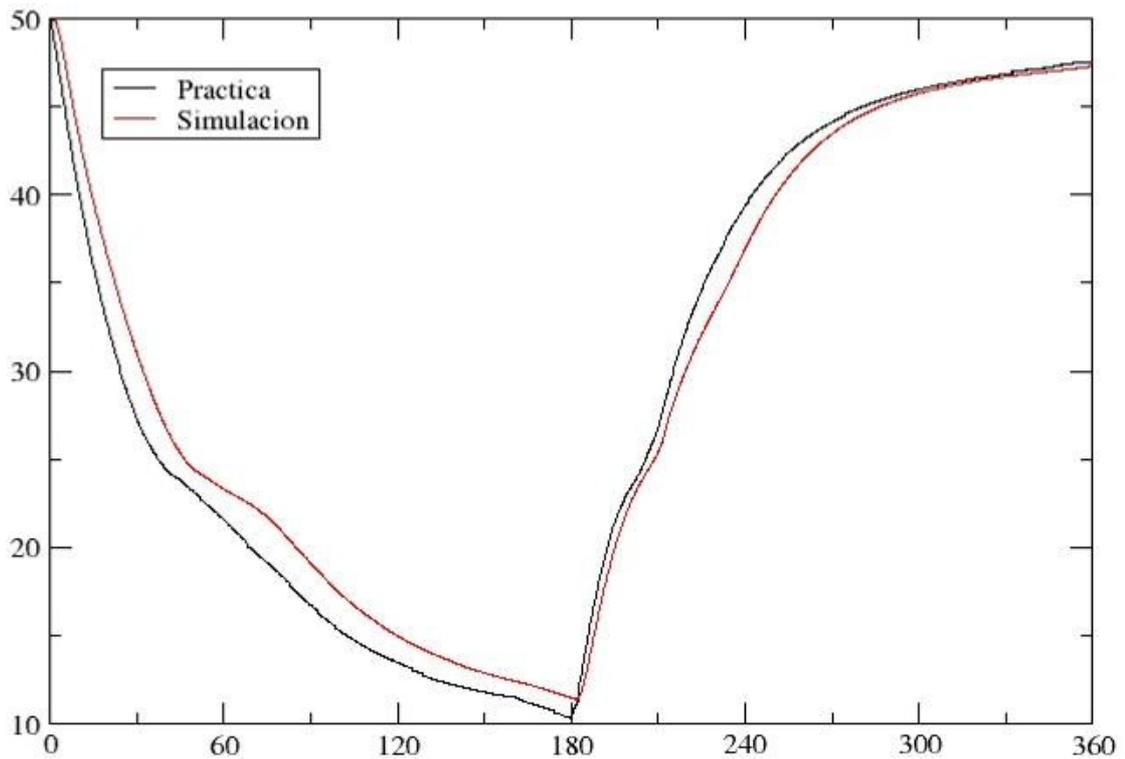
**Figura 56:** Comparación del comportamiento térmico de la práctica y de la simulación, para la placa de yeso con 10% de PCM DS 5008X.

4.2.3. Placa de yeso con 50% de PCM GR42 (1-3mm).



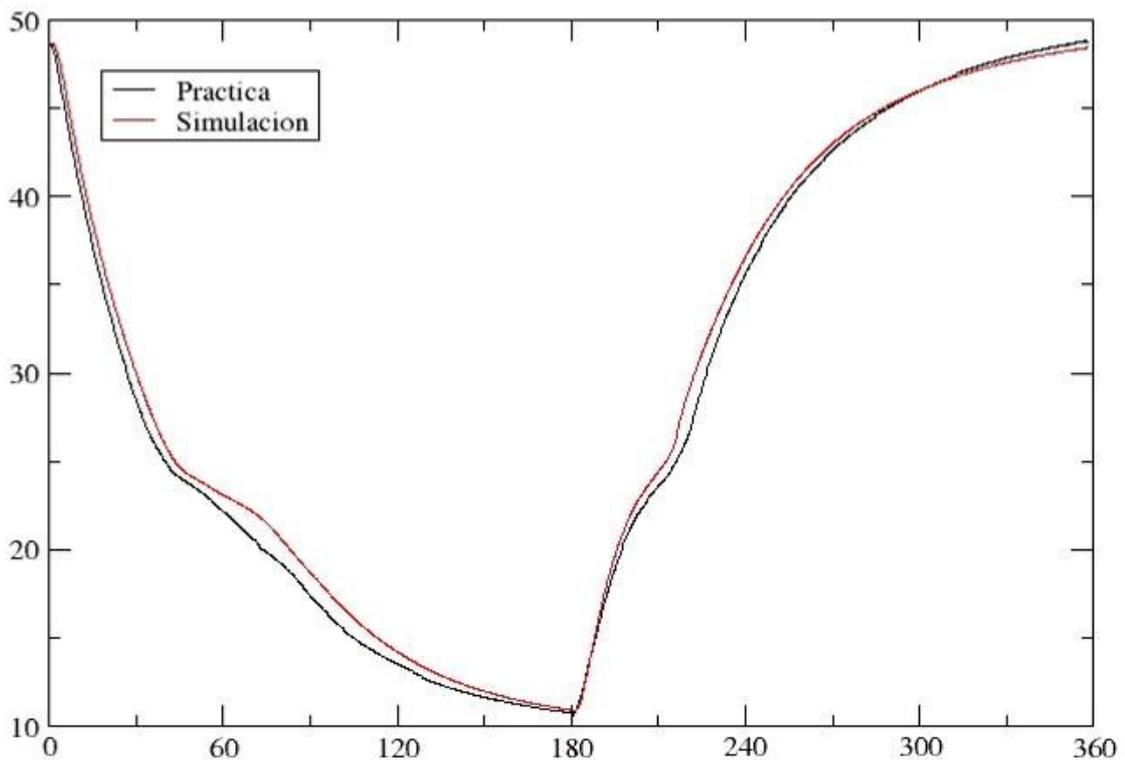
**Figura 57:** Comparación del comportamiento térmico de la práctica y de la simulación, para la placa de yeso con 50% de PCM GR42 (1-3mm).

#### 4.2.4. Placa de yeso con 5% de PCM DS 5001X y 5% PCM DS 5008X



**Figura 58:** Comparación del comportamiento térmico de la práctica y de la simulación, para la placa de yeso con 5% de PCM DS 5001X y 5% de PCM DS 5008X.

#### 4.2.5. Placa de yeso con 10% de PCM DS 5001X y 10% PCM DS 5008X



**Figura 59:** Comparación del comportamiento térmico de la práctica y de la simulación, para la placa de yeso con 10% de PCM DS 5001X y 10% de PCM DS 5008X.

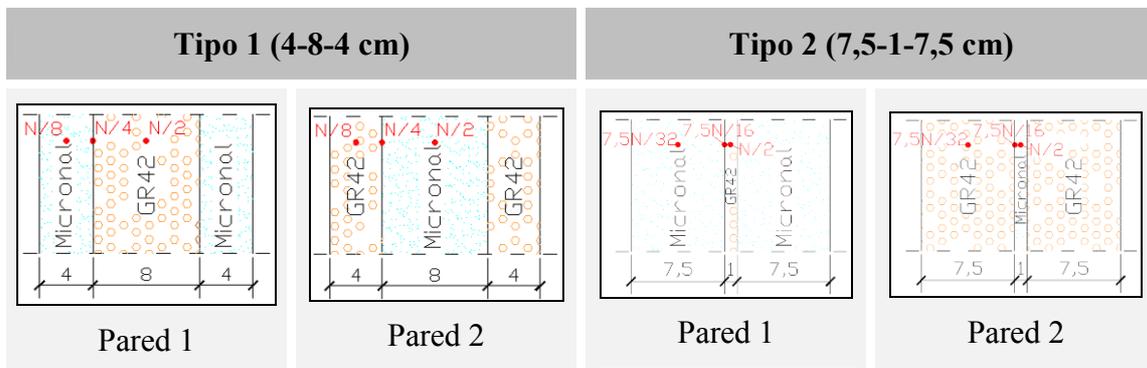
## 84 Análisis de la viabilidad de usar materiales con PCM en edificación

De las figuras anteriores se observa la gran similitud que tienen los comportamientos térmicos obtenidos a partir de las simulaciones con el programa, con respecto los resultados obtenidos de los ensayos realizados en el laboratorio.

Resaltar que el comportamiento teórico de los PCM se asemeja más al experimental, cuando sólo se utiliza un tipo. En el momento se mezclan dos PCM con temperaturas de cambio de fase diferentes, provoca que no se comporten como teóricamente lo harían dos procesos aislados, sino que ambos estén influenciados por el otro.

### **4.3 Simulaciones térmicas de paredes con varias capas.**

Tras observar la fiabilidad del programa, lo que en este punto se realiza son simulaciones de paredes formadas por varias capas. De estas capas se varía el grosor, el tipo y porcentaje de PCM que existe en cada una de ellas.



**Tabla 26:** Resumen de los tipos de paredes utilizados en las simulaciones.

Para igualar el valor de calor latente que tiene asociado cada PCM, se utilizan los siguientes porcentajes como composición de las capas:

Nombre capa	Cantidad PCM (%)	Cantidad yeso (%)
Micronal	21,5 DS 5001X 21,5 DS 5008X	57
GR42	100 GR42	0

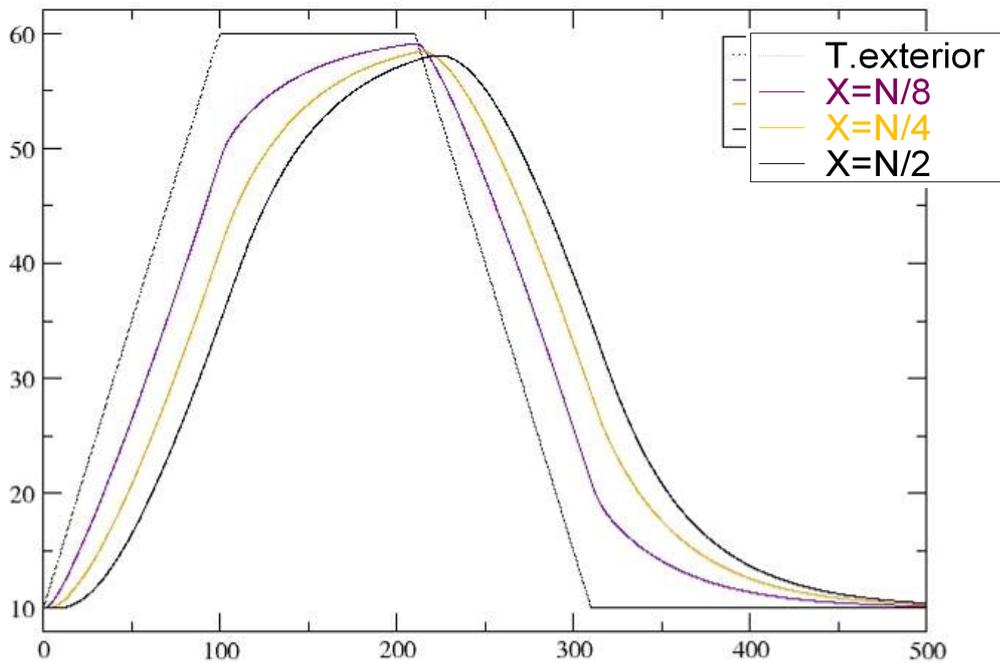
**Tabla 27:** Composición de las capas de PCM con mismo calor latente.

En este punto todas las simulaciones tienen las mismas condiciones térmicas. Primero sube de 10 a 60°C en 100 minutos, se mantiene a 60°C durante 120 minutos, desciende de 60 a 10°C en 100 minutos y por último, se mantiene a 10 °C durante 180 minutos.

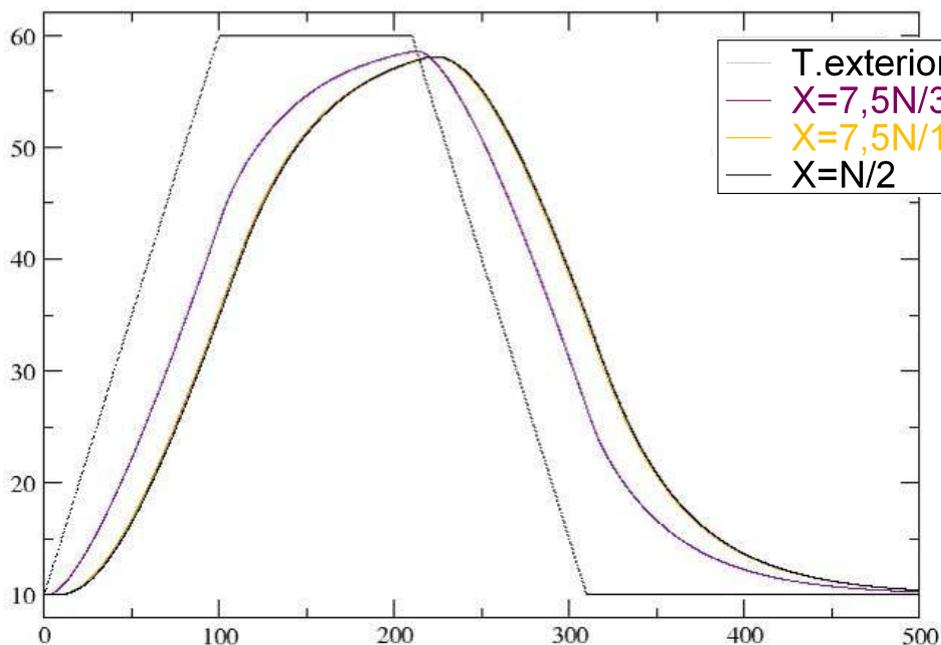
En cada figura obtenida de las simulaciones, se van a diferenciar zonas en las gráficas. Son los cambios de pendiente, resultado de los efectos térmicos que están sufriendo.

### PARED DE YESO

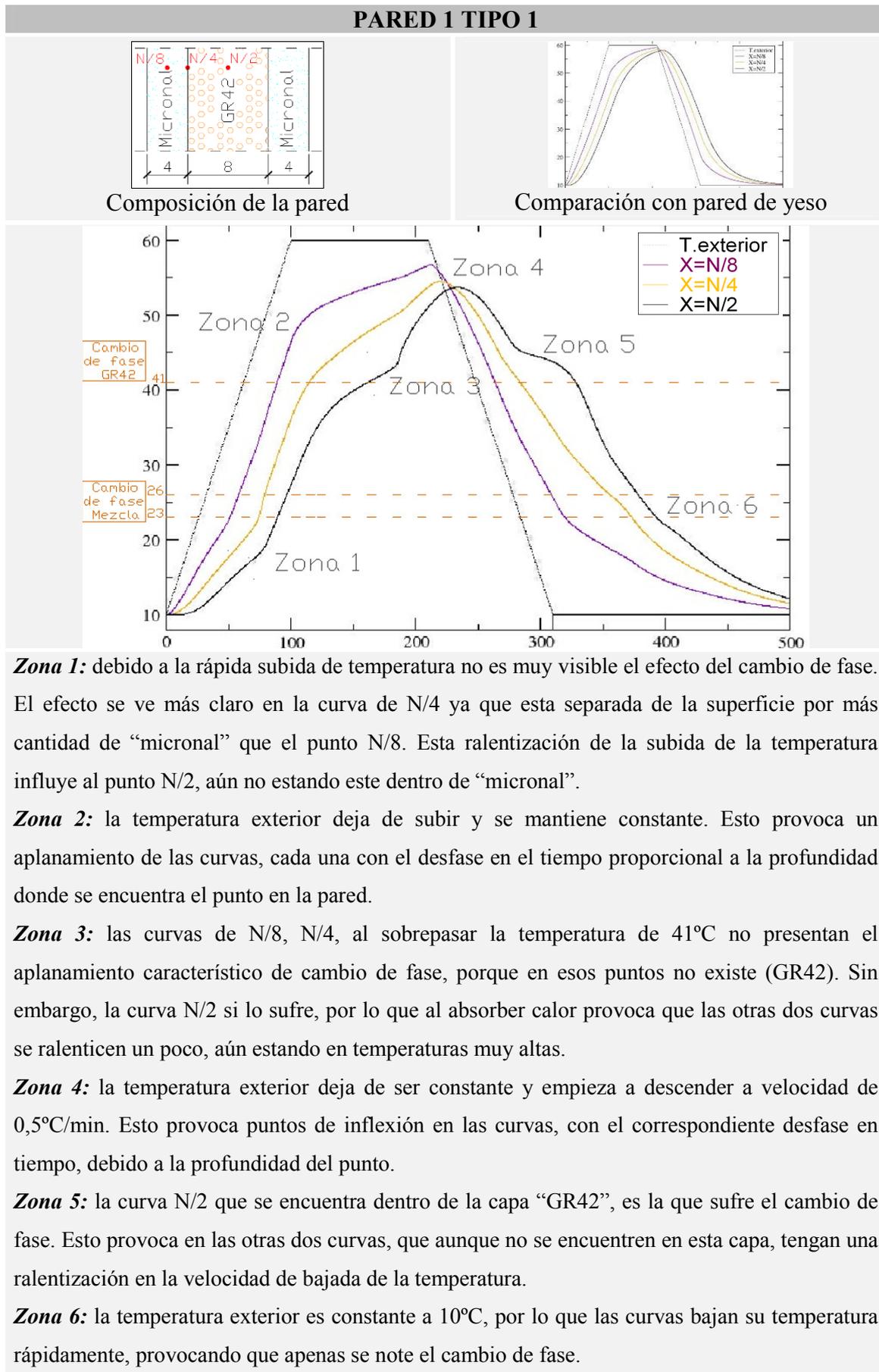
La primera simulación que se crea es con pared de yeso. Es la referencia para comparar los resultados obtenidos de las simulaciones creadas con el resto de paredes.



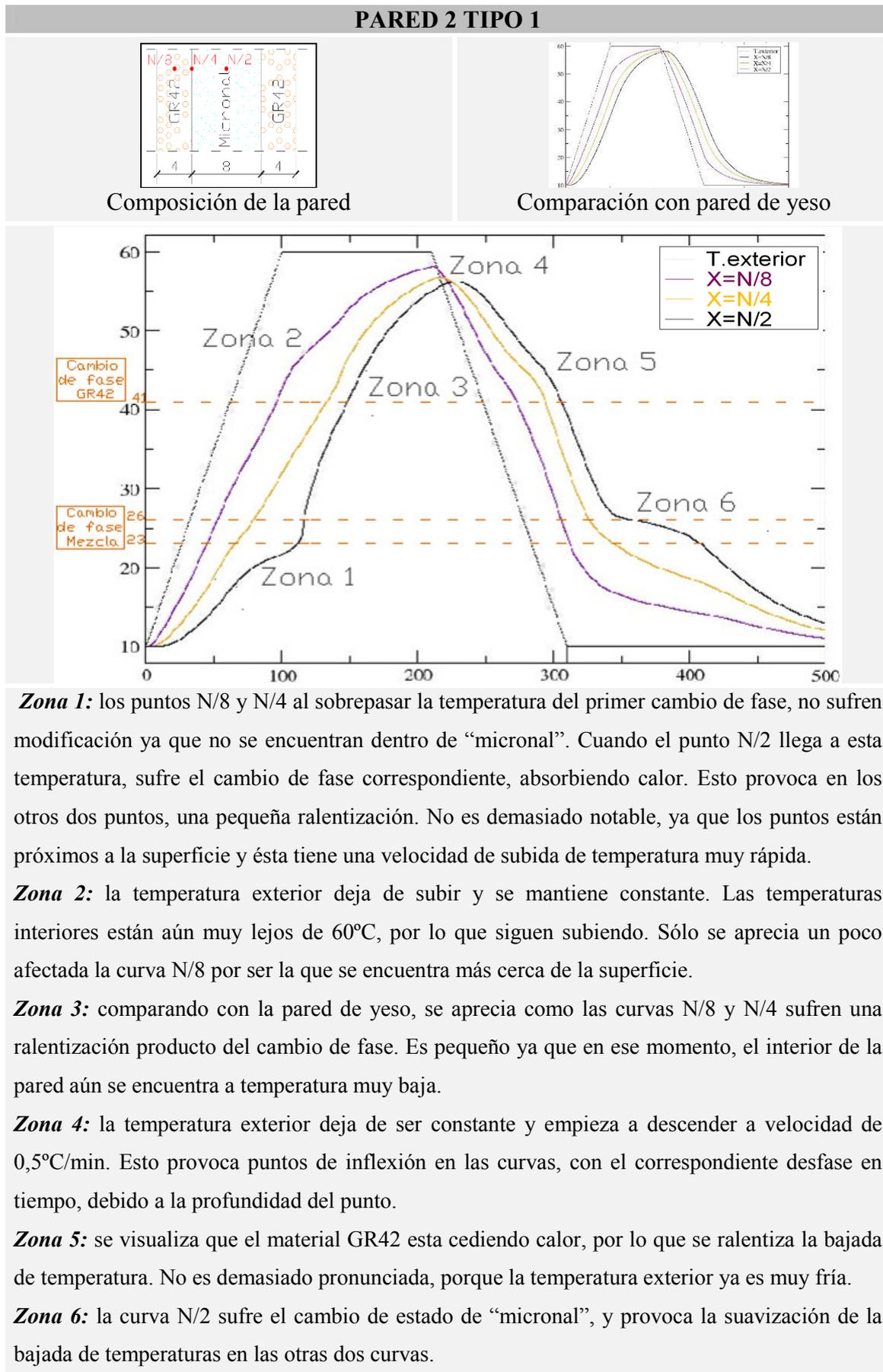
**Figura 60:** Comportamiento térmico de la pared de yeso tipo 1.



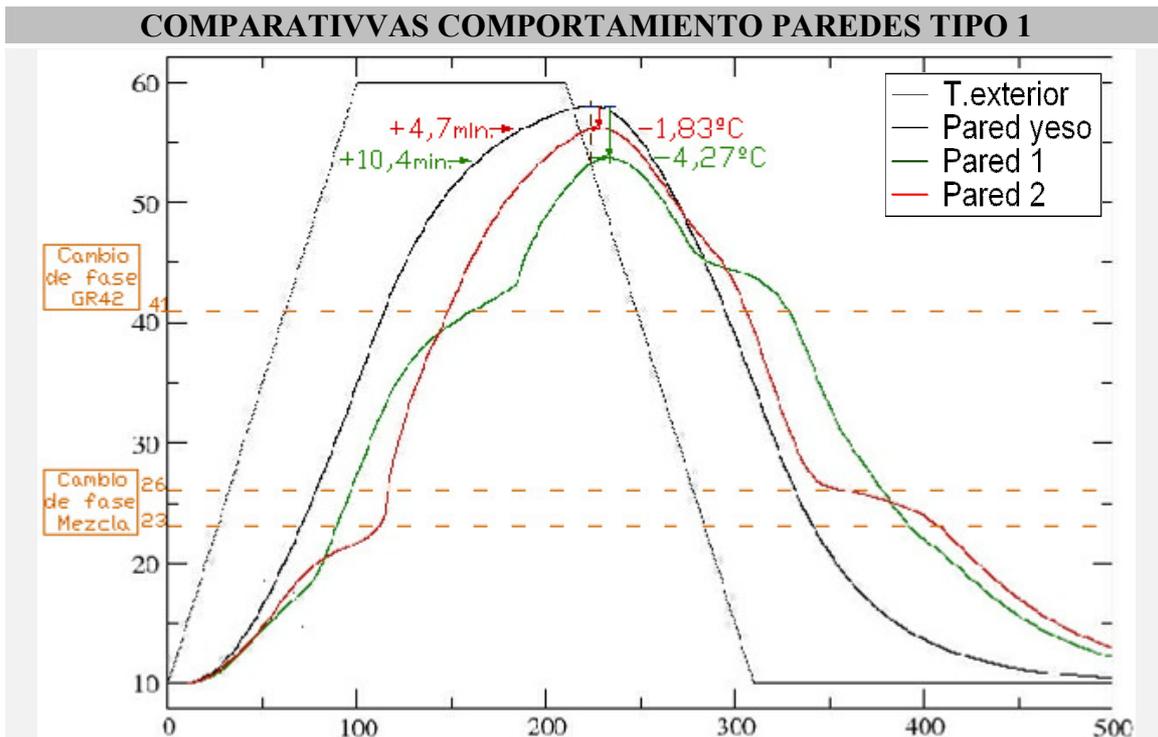
**Figura 61:** Comportamiento térmico de la pared de yeso tipo 2.



**Figura 62:** Resumen del comportamiento térmico para la pared 1 tipo 1.



**Figura 63:** Resumen del comportamiento térmico para la pared 2 tipo 1.

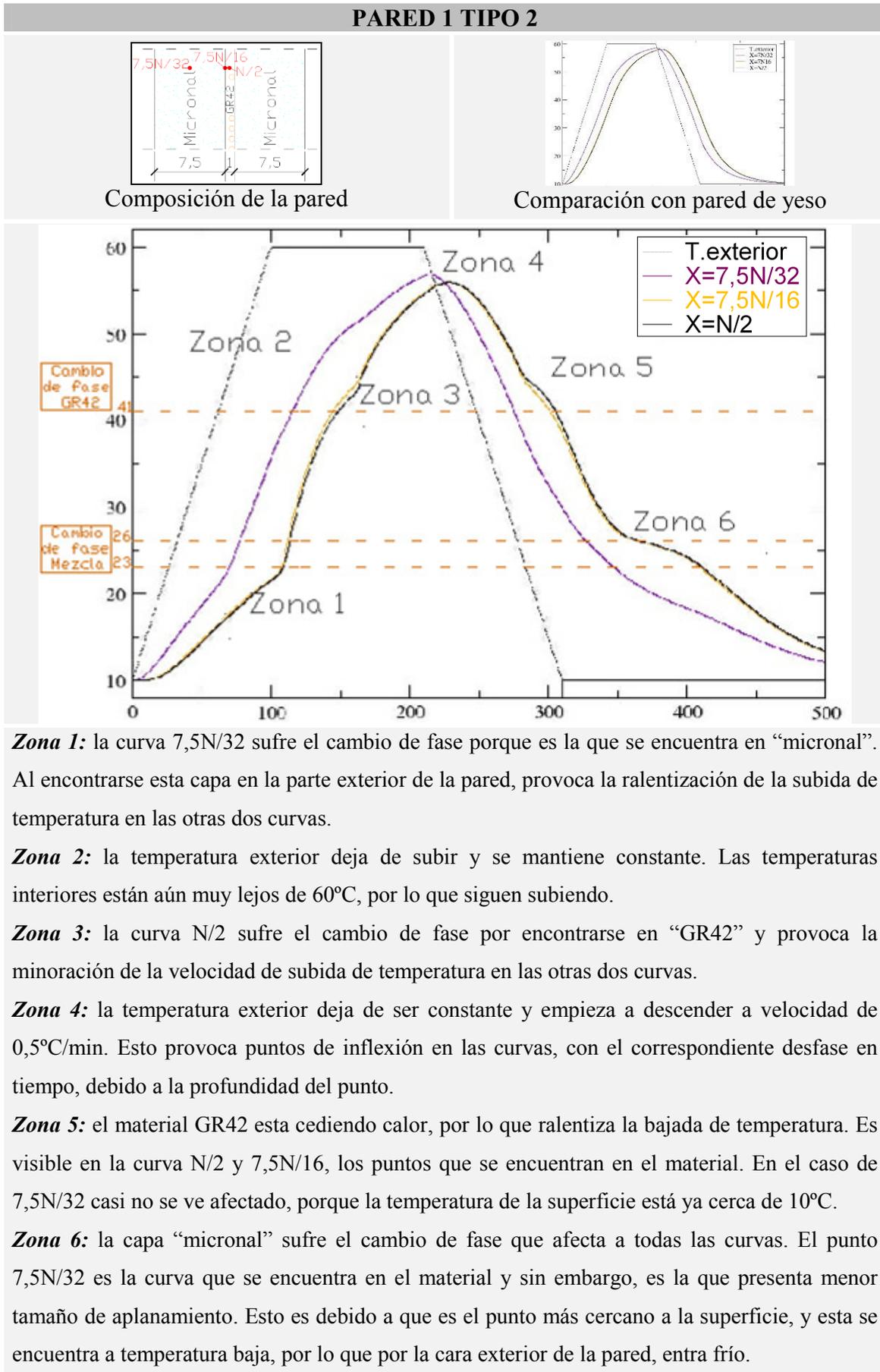


Como se observa en esta figura comparativa, ambas paredes tienen aspectos positivos respecto a la pared de yeso solo. Ambas provocan una ralentización tanto de subida como de bajada de la temperatura, pero destacar que la pared 1 trabaja mejor. El punto máximo tiene una amortiguación de la amplitud de onda de 4,3°C y un desfase de 10,4 minutos.

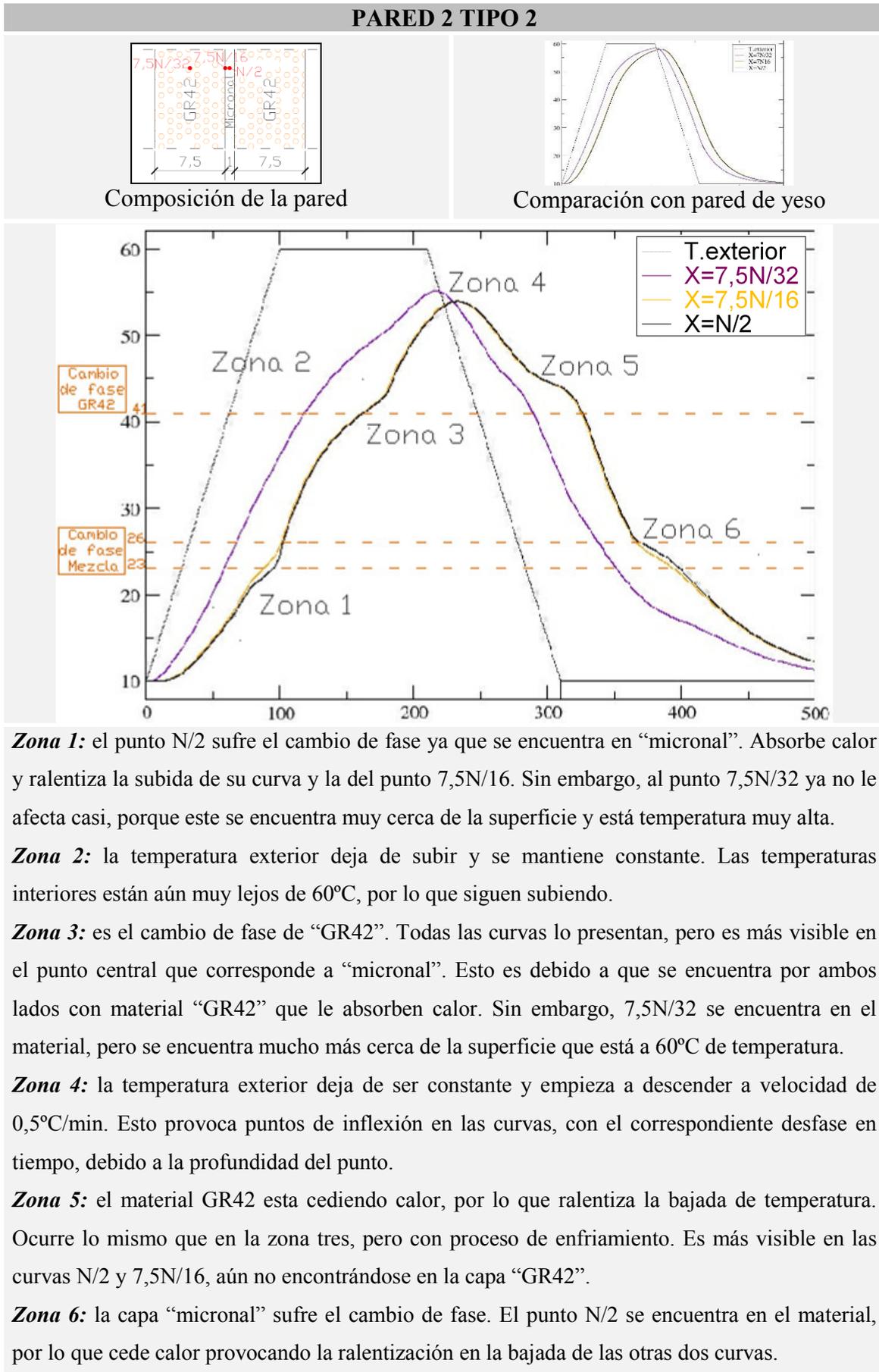
El motivo de que se obtengan mejores resultados en la pared uno, es porque los dos puntos de cambio de fase, influyen tanto a la capa donde se está produciendo, como ralentizan la velocidad de la temperatura de la otra capa. A medida que aumenta la temperatura exterior, el primer contacto es con las capas exteriores que contienen "micronal". Estas llegan al cambio de fase, lo producen (aunque sea pequeño), pero ralentizan la entrada de flujo de calor al interior. La temperatura sigue subiendo, llega al interior y con el material GR42 tenemos el segundo cambio de fase. Este cambio de fase absorbe calor de las capas "micronal", y ralentiza su velocidad de subida de temperatura.

Sin embargo, en la pared dos a medida que aumenta la temperatura, el flujo entra por la capa con GR42, que la atraviesa como si de yeso se tratase. El calor llega a la capa central "micronal", esta sí produce su cambio de fase, pero influye poco en las capas exteriores, porque la temperatura superficial es muy alta. A la vez ocurre lo contrario en las capas exteriores, estas se encuentran ya a temperatura para realizar el cambio de fase de GR42, pero existe tanta diferencia de temperatura con el interior, que apenas se nota.

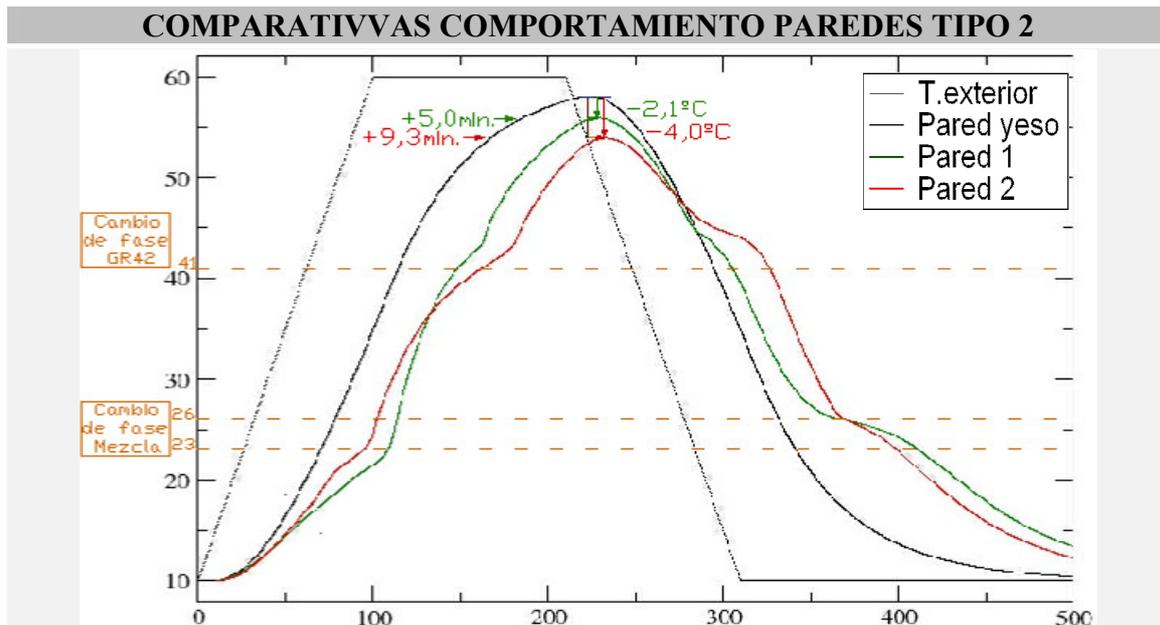
**Figura 64:** Resumen de la comparación de comportamientos de las paredes tipo 1.



**Figura 65:** Resumen del comportamiento térmico para la pared 1 tipo 2.



**Figura 66:** Resumen del comportamiento térmico para la pared 2 tipo 2.



Como se observa en esta figura comparativa, ambas paredes tienen aspectos positivos respecto a la pared de yeso solo. Ambas provocan una ralentización tanto de subida como de bajada de la temperatura, pero para estas composiciones de paredes, la pared dos trabaja mejor. El punto máximo tiene amortiguación de amplitud de onda de 4,0°C y desfase en el tiempo de 9,3 min.

A diferencia de las composiciones de pared tipo uno, aquí la capa central es muy fina en comparación con las exteriores. Esto provoca que en la pared 1, se produzca un buen cambio de fase en “micronal”, pero si siguen aumentando mucho las temperaturas, como es el caso, al llegar al cambio de fase de “GR42”, como hay muy poco material, apenas se amortigüe la onda.

Sin embargo, en la pared dos el cambio de fase en “micronal” es pequeño. (Si se cortara aquí la onda, funcionaría mejor la pared 1). Pero la temperatura sigue subiendo y al llegar cerca de los 40°C, produce el cambio de fase de “GR42”. En este caso provoca gran amortiguación de onda, que se transmite en que el pico máximo tenga una temperatura de 4°C inferior a la del yeso.

Para este tipo de composición en el que no tienen los mismos espesores las capas, funciona mejor la pared que tiene gran cantidad de “GR42”. Esto es debido a que la simulación se decide hacer con temperaturas de hasta 60°C, sino, no tiene sentido el material “GR42”.

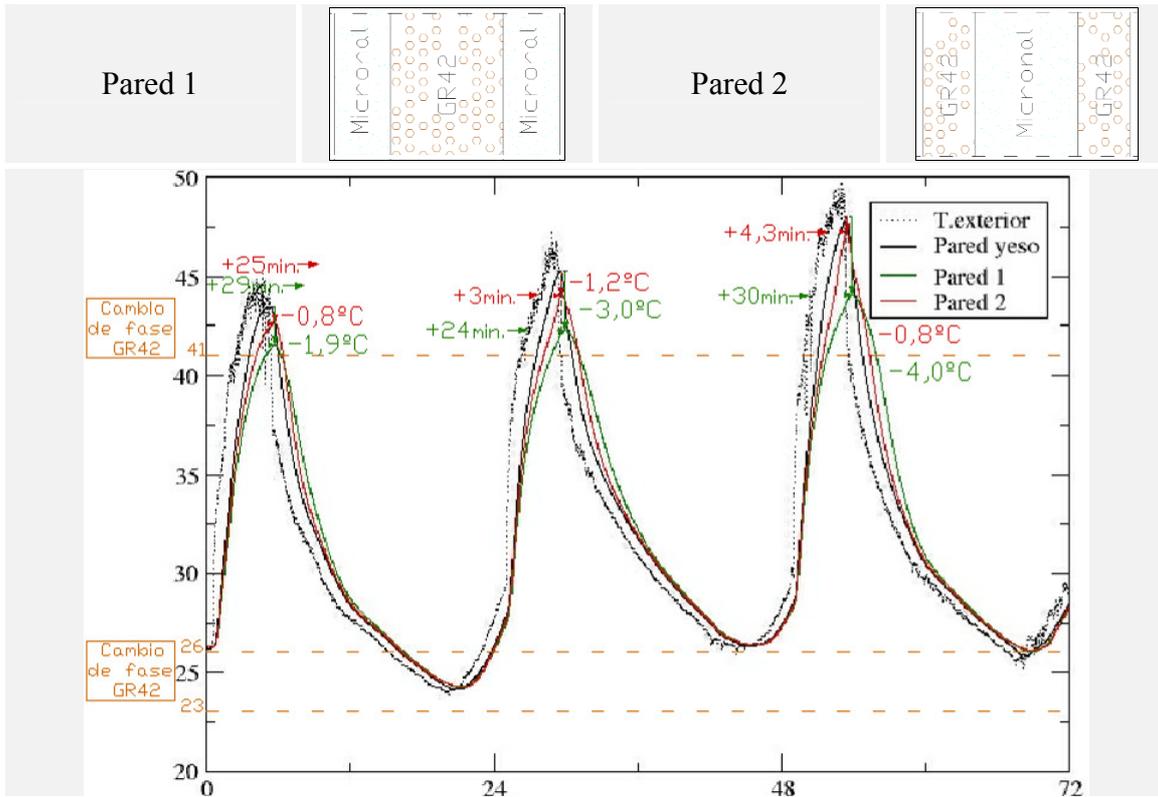
**Figura 67:** Resumen de la comparación de comportamientos de las paredes tipo 2.

### **4.3 Simulaciones térmicas de paredes con varias capas.**

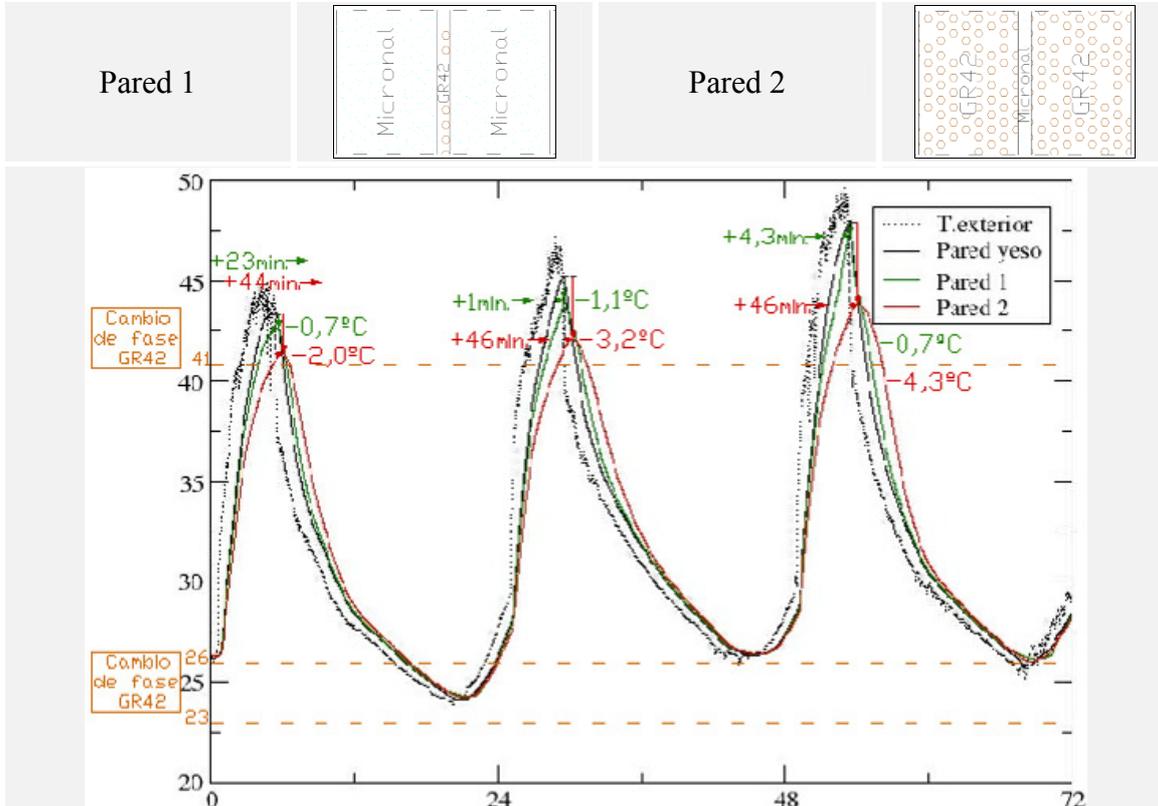
Se ha querido utilizar el programa para hacer simulaciones con datos climáticos reales. Para ello, se han escogido los días 20,21 y 22 de agosto, como ejemplo de días con temperaturas muy elevadas; y los días 27, 28 y 29 de Septiembre, con datos de temperaturas más suaves. La toma de datos en todos los casos ha sido mediante un termo par colocado en la superficie y otro en el interior de la placa.

**DATOS TEMPERATURAS EXTERIORES EN AGOSTO**

**Comportamiento en paredes tipo 1**



**Comportamiento en paredes tipo 2**



**Figura 68:** Resumen comportamiento de todas las paredes, para el mes de Agosto.

Esta figura simula el comportamiento de las paredes ficticias, con datos de temperaturas reales tomados de tres días consecutivos del mes de Agosto. En los tres días, las temperaturas exteriores son elevadas, sobrepasan la temperatura de cambio de fase de ambos materiales, “micronal” y “GR 42”.

- La primera gráfica representa las paredes tipo uno. Los comportamientos que presentan son los mismo que en la figura 69 de este mismo punto “*Resumen de la comparación de comportamientos de las paredes tipo 1*”. Las diferencias existentes se deben a que las temperaturas exteriores en estas simulaciones, no presentan cambios tan bruscos ni controlados.

- La segunda gráfica representa las paredes tipo dos. Aquí los comportamientos que presentan son equivalentes a la figura 72 de este mismo punto “*Resumen de la comparación de comportamientos de las paredes tipo 2*”. En este caso también, las diferencias existentes entre ambas, se deben a que las temperaturas exteriores no presentan cambios tan bruscos ni controlados.

A continuación se observan todas las gráficas conjuntamente para determinar cual es el mejor comportamiento para los datos climáticos del mes de Agosto. Para ello, se analizan dos cuestiones:

- En primer lugar los amortiguamientos que presentan los valores de las temperaturas, respecto las paredes de yeso. En ambos casos se observa como a más temperatura exterior, la amortiguación es más efectiva. Los mayores valores los presentan las paredes tipo dos, y el máximo de 4,2°C, corresponde a la pared dos dentro de este tipo.

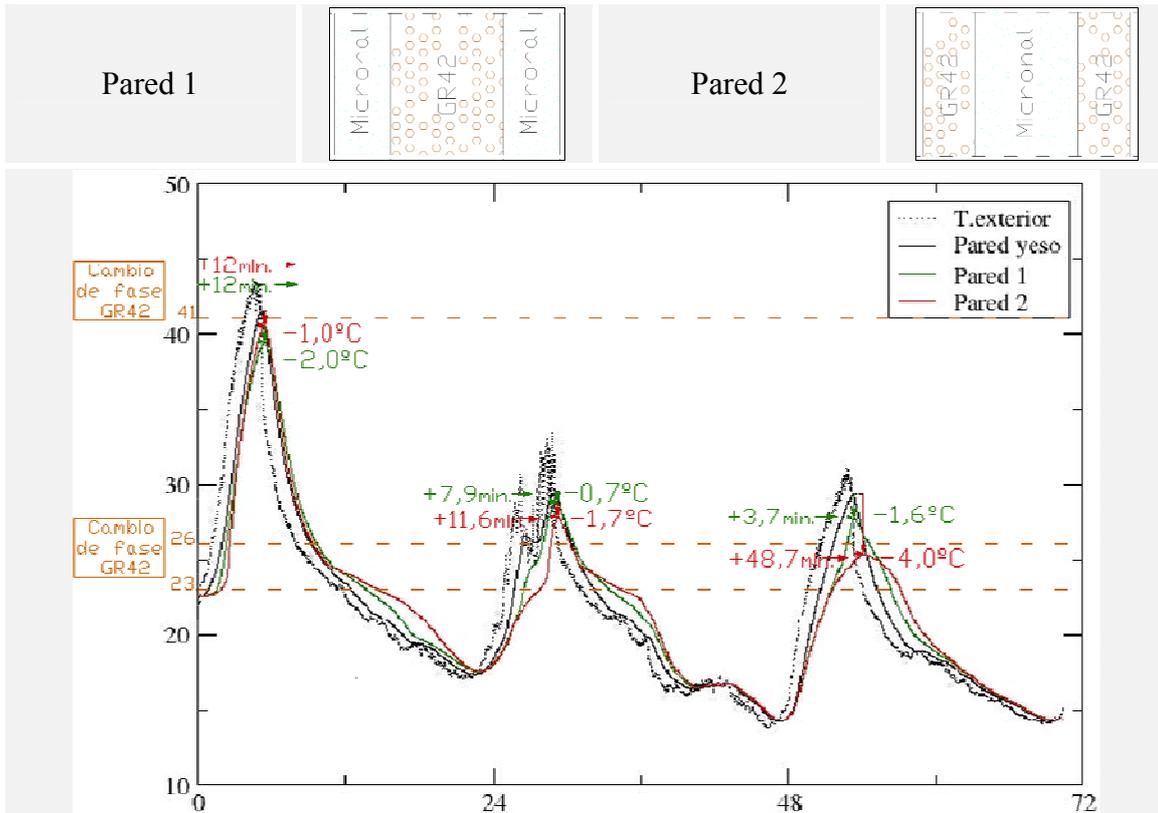
- En segundo lugar los desfases en el tiempo de los máximos valores de temperatura, respecto las paredes de yeso. Destacar que las paredes tipo dos, presentan valores sustancialmente más elevados que las tipo uno. El máximo valor corresponde a cuarenta y seis minutos, y lo adquiere la pared dos dentro de las tipo dos.

Por lo que se concluye diciendo, que para datos climáticos similares a los recogidos en el mes de Agosto, de las cuatro paredes ficticias simuladas, la que mejor comportamiento presenta, es la pared dos, dentro de las paredes tipo dos.

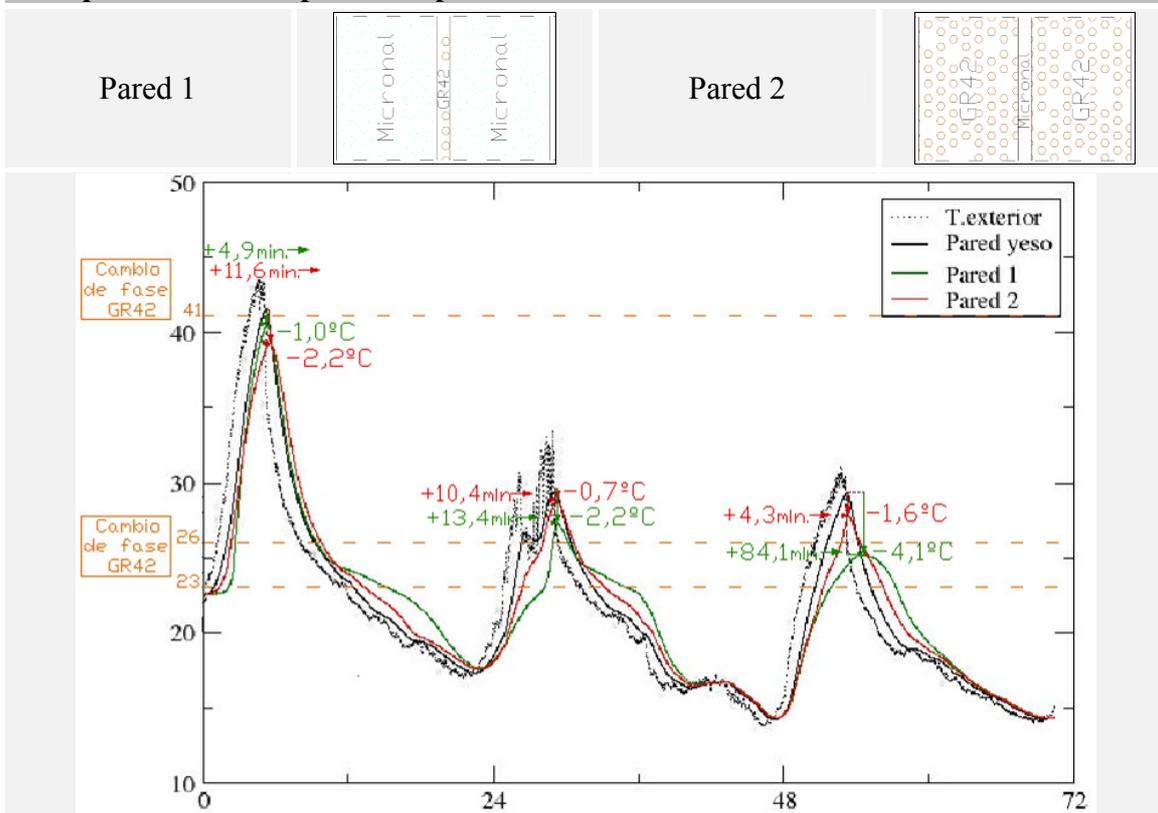
Las capas de esta pared son: 7,5cm “GR42” + 1cm “micronal” + 7,5cm “GR42”.

**DATOS TEMPERATURAS EXTERIORES EN SEPTIEMBRE**

**Comportamiento en paredes tipo 1**



**Comportamiento en paredes tipo 2**



**Figura 69:** Resumen comportamiento de todas las paredes, para el mes de Septiembre.

En la figura anterior, se simula el comportamiento de las paredes ficticias, con datos de temperaturas reales tomados de tres días consecutivos del mes de Septiembre. En este caso, la temperatura de cambio de fase de “GR42”, sólo se sobrepasa el primer día. Sin embargo, la temperatura de cambio de fase de “micronal” se sobrepasa en los tres días.

- La primera gráfica representa las paredes tipo uno. Para el primer día (con temperaturas superiores a 41°C), el comportamiento que presenta es semejante al de la figura 69 *“Resumen de la comparación de comportamientos de las paredes tipo 1”*, y al de la primera gráfica de la figura 73 *“Resumen comportamiento de todas las paredes, para el mes de Agosto” de este mismo punto*. Sin embargo, en los dos días posteriores, el comportamiento cambia, ya que no se alcanza la temperatura de fusión de “GR42”.

- La segunda gráfica representa las paredes tipo dos. En el primer día (temperaturas superiores a 41°C), los comportamientos que presentan son equivalentes a la figura 72 *“Resumen de la comparación de comportamientos de las paredes tipo 2”*, y a la segunda gráfica de la figura 73 . *“Resumen comportamiento de todas las paredes, para el mes de Agosto” de este mismo punto*. Sin embargo, en los dos días posteriores, al igual que el caso anterior, el comportamiento cambia, ya que no se alcanza la temperatura de fusión de “GR42”.

Por lo que en el primer día de ambas gráficas, presentan comportamiento análogo al observado con los datos del mes de Agosto.

Con los datos climatológicos del mes de Septiembre, se deduce que no tiene utilidad la incorporación de capas de material “GR42” en su composición, ya que no se alcanza su temperatura de fusión. Por este motivo, la observando todas las gráficas de la figura 74, la composición que mejor funciona, corresponde con la que mayor cantidad de “micronal” tiene.



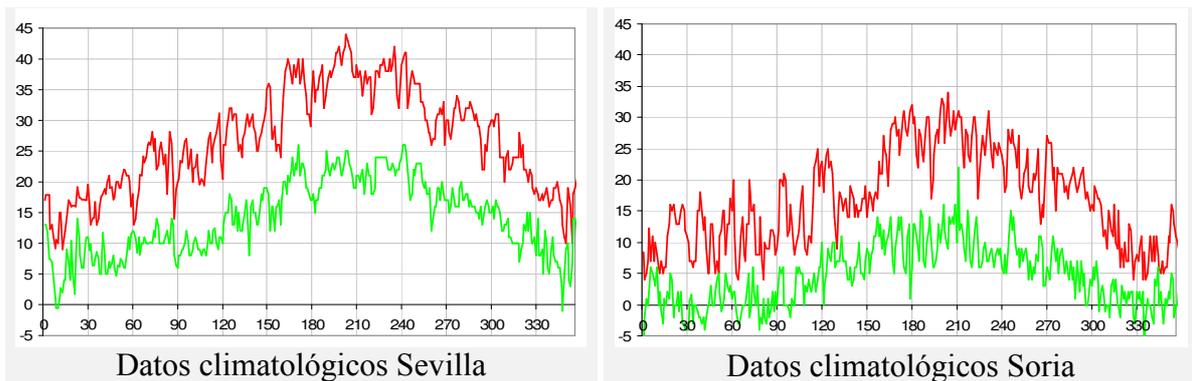
## **5. Simulaciones creadas con el programa PCM Express.**

El programa PCM express se desarrolló en el marco de un proyecto de investigación en cooperación con el Instituto Fraunhofer de Tecnología de Energía Solar (ISE) en Freiburg, la compañía Valentín Energiesoftware y otros socios industriales. Es un programa de planificación y simulación para los edificios con materiales de cambio de fase (PCM).

Con este programa se han realizado varias simulaciones en una casa ficticia, cambiando parámetros que condicionan el comportamiento y por tanto los resultados a estudiar, para así poder analizar el comportamiento de los PCM en diferentes circunstancias. (En el ANEXO VII, se adjuntan todos los datos y resultados de cada simulación).

### **5.1 Parámetros que varían en cada simulación.**

-*El clima.* Se han hecho simulaciones con los datos climatológicos de Soria (como ejemplo de clima frío) y Sevilla (como ejemplo de clima cálido), para comprobar el buen comportamiento de los PCM tanto para refrigeración como para calefacción.

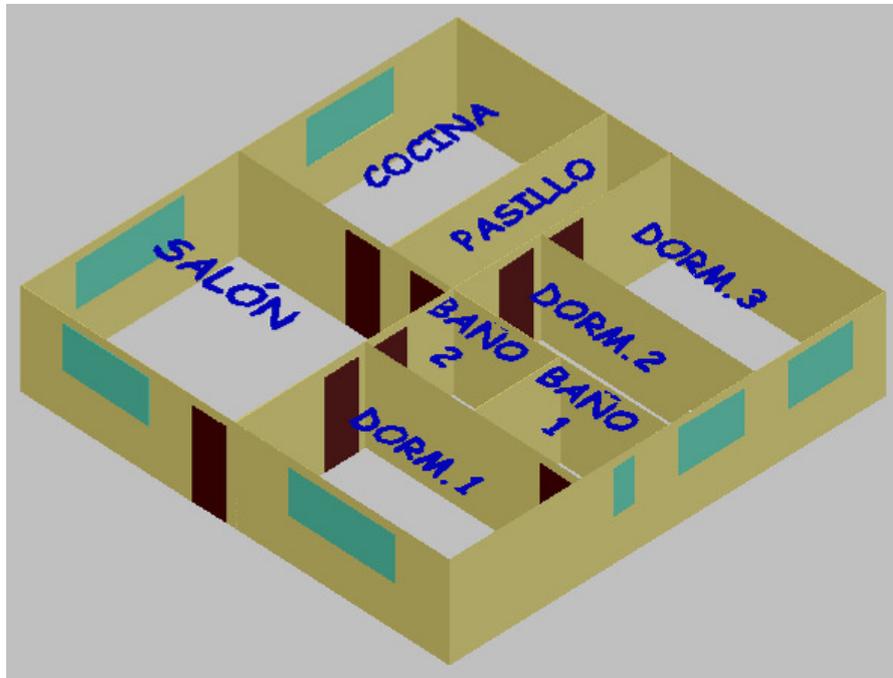


**Figura 70:** datos climatológicos para ambas ciudades en el año 2007.

-En zonas de clima cálido donde la temperatura nocturna exterior es superior a 18°C (Sevilla), utilizar PCM puede significar un importante ahorro energético en climatización. En estas zonas la combinación de paredes con PCM y la ventilación natural nocturna, sin ningún sistema de refrigeración adicional, puede reducir sustancialmente el pico de demanda de potencia.

-En el caso de zonas de clima frío (Soria), el ahorro energético no sólo se centrará en la calefacción, ya que en refrigeración, puede provocar la eliminación de la necesidad de utilizar la refrigeración.

**-La posición del material PCM en los cerramientos.** Se ha colocado el mismo material PCM con la misma composición, en la cara exterior o en la cara interior de los mismos cerramientos. Se ha tenido en cuenta que cuando se coloca en la cara exterior, al tratarse de yeso, debe estar protegido por otro material.



**Figura 71:** Imagen interior de la vivienda creada en las simulaciones.

**-El momento de cambio de fase del material PCM.** Los materiales que se utilizan en las simulaciones son placas de yeso que introducen PCM en su mezcla. Los PCM utilizados son parafinas de calor latente con tres valores diferentes para la temperatura de cambio de fase 21, 23 y 26°C. Todos los valores están dentro de un rango de temperatura que se adaptan a los edificios, es decir, dentro del intervalo de bienestar humano (21-26°C).

## 5.2 Características comunes de la vivienda.



*Figura 72:* Imagen exterior de la vivienda creada en las simulaciones.

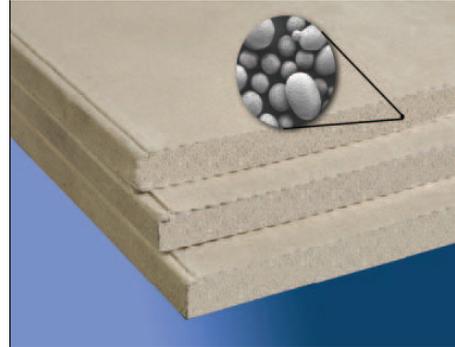
La vivienda será la misma en todas las simulaciones. Sus características son:

- Vivienda unifamiliar aislada de una altura.
- Ventilación natural todas las estancias menos el aseo que tiene ventilación forzada.
- Además como exige el CTE-HS3 dispone de ventilación híbrida en todas las estancias, con flujo de ventilación de cuartos húmedos a cuartos secos.
- Todas las construcciones con PCM integrado tienen que ser regeneradas durante la noche de verano para tener una capacidad de almacenamiento de calor suficiente al día siguiente. Esta regeneración se hará con la ventilación natural nocturna.
- Como aconsejan las normativas de ahorro energético, en ningún caso se programará la calefacción para que encienda a temperaturas superiores de 21°C, ni la refrigeración a temperaturas inferiores de 26°C.
- Sistema de calefacción con radiadores de 80W/m<sup>2</sup>. El sistema de calefacción, tiene en cuenta la obligación de la ventilación.
- Como se ha comentado anteriormente, se consideran dos situaciones diferentes, una de clima cálido (Sevilla) y otra de clima frío (Soria). El periodo de calefacción estimado para Sevilla va desde 1/11/2007 al 31/03/2008. El periodo estimado para Soria va desde 1/09/2007 al 31/05/2008.
- Sistema de refrigeración con aparatos de aire de 80W/m<sup>2</sup>. El sistema de refrigeración, tiene en cuenta la obligación de la ventilación.

## 100 Análisis de la viabilidad de usar materiales con PCM en edificación

### Placas utilizadas en la simulación.

Son paneles de yeso con PCM incorporado. Estas placas pueden ser integradas en construcción de manera rápida y fácil con los conceptos innovadores de construcción en seco. Cada metro cuadrado de este material de construcción consta de tres kilogramos de parafina de calor latente encapsulada. La capacidad calorífica de una construcción de pared, con dos capas de 15 mm, es comparable a un muro de hormigón de 14cm de espesor o de 36,5cm de espesor de ladrillo.

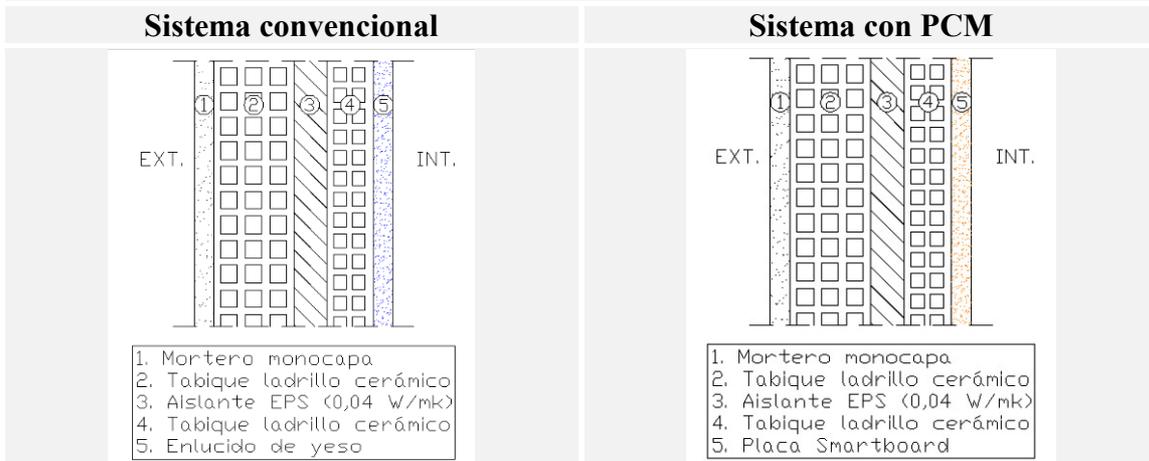


### Ventajas de usar placas de yeso con el material PCM incorporado:

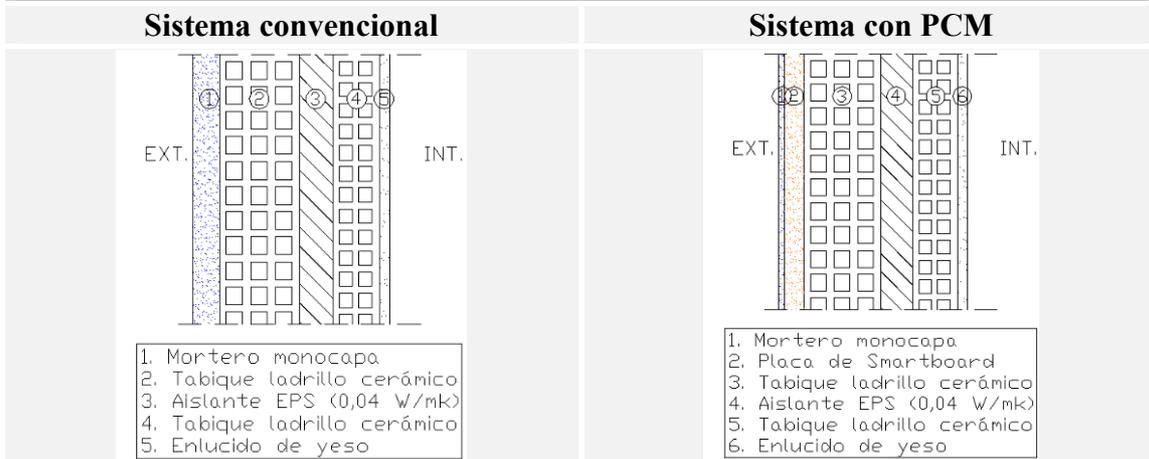
- Es muy fácil de usar, no tiene diferencia con la construcción convencional o estructural. No es necesario extra necesario para el material de cambio de fase.
- Optimiza la tecnología de encapsulación para su incorporación en edificios.
- Reduce o restringe completamente el consumo de energía del consumo convencional de aire acondicionado, por lo que mejora el valor del edificio.

**5.3 Composiciones de las paredes utilizadas en las simulaciones.**

**Smartboard colocado en la cara interior.**



**Smartboard colocado en la cara exterior.**



**Figura 73:** Composición de las paredes utilizadas.

**5.4 Tablas comparativas. Sevilla**

	<b>Smartboard 21</b>	<b>Smartboard 23</b>	<b>Smartboard 26</b>
<b>CALEFACCIÓN</b>			
<b>KWh/año (sist. convencional)</b>	979,41	979,41	979,41
<b>KWh/año (sist. PCM)</b>	814,07	812,64	818,60
<b>KWh/año (ahorrados)</b>	165,34	166,77	160,81
<b>% Ahorro energético</b>	16,88 %	17,03 %	16,42 %
<b>€ de ahorro al año</b>	<b>19,84 €</b>	<b>20,01 €</b>	<b>19,30 €</b>
<b>REFRIGERACIÓN</b>			
<b>KWh/año (sist. convencional)</b>	3.192,43	3.192,43	3.192,43
<b>KWh/año (sist. PCM)</b>	2.973,23	2.915,08	2.950,43
<b>KWh/año (ahorrados)</b>	219,20	277,35	242,00
<b>% Ahorro energético</b>	6,87 %	8,69 %	7,58 %
<b>€ de ahorro al año</b>	<b>26,31 €</b>	<b>33,29 €</b>	<b>29,04 €</b>

*Tabla 28:* Simulaciones para Sevilla, con PCM en la cara interior de las paredes.

	<b>Smartboard 21</b>	<b>Smartboard 23</b>	<b>Smartboard 26</b>
<b>CALEFACCIÓN</b>			
<b>KWh/año (sist. convencional)</b>	973,18	973,18	973,18
<b>KWh/año (sist. PCM)</b>	816,64	815,79	823,23
<b>KWh/año (ahorrados)</b>	156,54	157,39	149,95
<b>% Ahorro energético</b>	16,57 %	16,17 %	15,41 %
<b>€ de ahorro al año</b>	<b>16,09 €</b>	<b>18,89 €</b>	<b>17,99 €</b>
<b>REFRIGERACIÓN</b>			
<b>KWh/año (sist. convencional)</b>	3.216,37	3.216,37	3.216,37
<b>KWh/año (sist. PCM)</b>	2.996,22	2.955,28	2.964,20
<b>KWh/año (ahorrados)</b>	220,15	261,09	252,17
<b>% Ahorro energético</b>	6,85 %	8,12 %	7,84 %
<b>€ de ahorro al año</b>	<b>26,42 €</b>	<b>31,33 €</b>	<b>30,26 €</b>

*Tabla 29:* Simulaciones para Sevilla, con PCM en la cara exterior de las paredes.

**5.5 Tablas comparativas. Soria**

	<b>Smartboard 21</b>	<b>Smartboard 23</b>	<b>Smartboard 26</b>
<b>CALEFACCIÓN</b>			
<b>KWh/año (sist. convencional)</b>	3.999,72	3.999,72	3.999,72
<b>KWh/año (sist. PCM)</b>	3.605,08	3.589,37	3.594,99
<b>KWh/año (ahorrados)</b>	394,64	410,35	404,73
<b>% Ahorro energético</b>	9,87 %	10,26 %	10,12 %
<b>€ de ahorro al año</b>	<b>55,25 €</b>	<b>57,45 €</b>	<b>56,66 €</b>
<b>REFRIGERACIÓN</b>			
<b>KWh/año (sist. convencional)</b>	444,52	444,52	444,52
<b>KWh/año (sist. PCM)</b>	315,93	245,07	274,57
<b>KWh/año (ahorrados)</b>	128,59	199,45	169,95
<b>% Ahorro energético</b>	28,93 %	44,87 %	38,23 %
<b>€ de ahorro al año</b>	<b>18,00 €</b>	<b>27,92 €</b>	<b>23,79 €</b>

*Tabla 30:* Simulaciones para Soria, con PCM en la cara interior de las paredes.

	<b>Smartboard 21</b>	<b>Smartboard 23</b>	<b>Smartboard 26</b>
<b>CALEFACCIÓN</b>			
<b>KWh/año (sist. convencional)</b>	3.999,72	3.999,72	3.999,72
<b>KWh/año (sist. PCM)</b>	3.590,08	3.580,30	3.585,25
<b>KWh/año (ahorrados)</b>	409,64	419,42	414,47
<b>% Ahorro energético</b>	10,24 %	10,49 %	10,36 %
<b>€ de ahorro al año</b>	<b>57,35 €</b>	<b>58,72 €</b>	<b>58,03 €</b>
<b>REFRIGERACIÓN</b>			
<b>KWh/año (sist. convencional)</b>	444,52	444,52	444,52
<b>KWh/año (sist. PCM)</b>	325,57	286,52	297,57
<b>KWh/año (ahorrados)</b>	118,95	158,00	146,95
<b>% Ahorro energético</b>	26,76 %	35,54 %	33,06 %
<b>€ de ahorro al año</b>	<b>16,65 €</b>	<b>22,12 €</b>	<b>20,57 €</b>

*Tabla 31:* Simulaciones para Soria, con PCM en la cara exterior de las paredes.

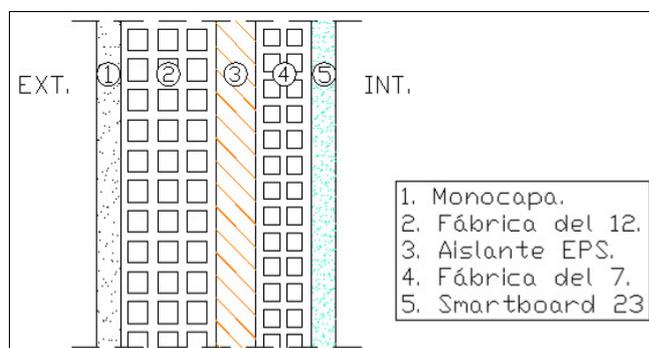
### **5.6 Análisis de los mejores resultados y conclusiones.**

En el ANEXO VII se detallan los resultados obtenidos de todas las simulaciones.

El resultado de estas simulaciones es la mejora del confort térmico en las viviendas que incorporar PCM en sus paredes. Destacar que para ambos climas, la mejor solución es SmartBoard 23 colocado en la parte interior de los cerramientos.

#### **¿Por qué es la mejor solución?**

Colocación en la parte interior del cerramiento. Esta solución es mejor que colocarlo fuera porque el aislante ayuda al PCM, provocando en la casa efecto de caja hermética.



**Figura 74:** Composición del cerramiento con SmartBoard 23.

#### SmartBoard con cambio de fase a 23°C.

Respecto SmartBoard 21: porque al realizarse el cambio de fase a mayor temperatura (23°C), la capacidad de almacenamiento es mayor.

Respecto SmartBoard 26: porque aunque este tenga mayor capacidad de almacenamiento, la temperatura de cambio de fase es muy tarde, casi ya fuera del rango de confort humano.

En refrigeración esto provoca que actúen los sistemas antes de llegar a los 26°C. Por lo que se enfría el ambiente y no se llega a la temperatura de fusión. Para el caso de la calefacción pasa algo parecido, cuando la temperatura del ambiente es alrededor de 23°C, esta se desconecta y no llega la temperatura a los 26°C necesarios.

#### Conclusiones.

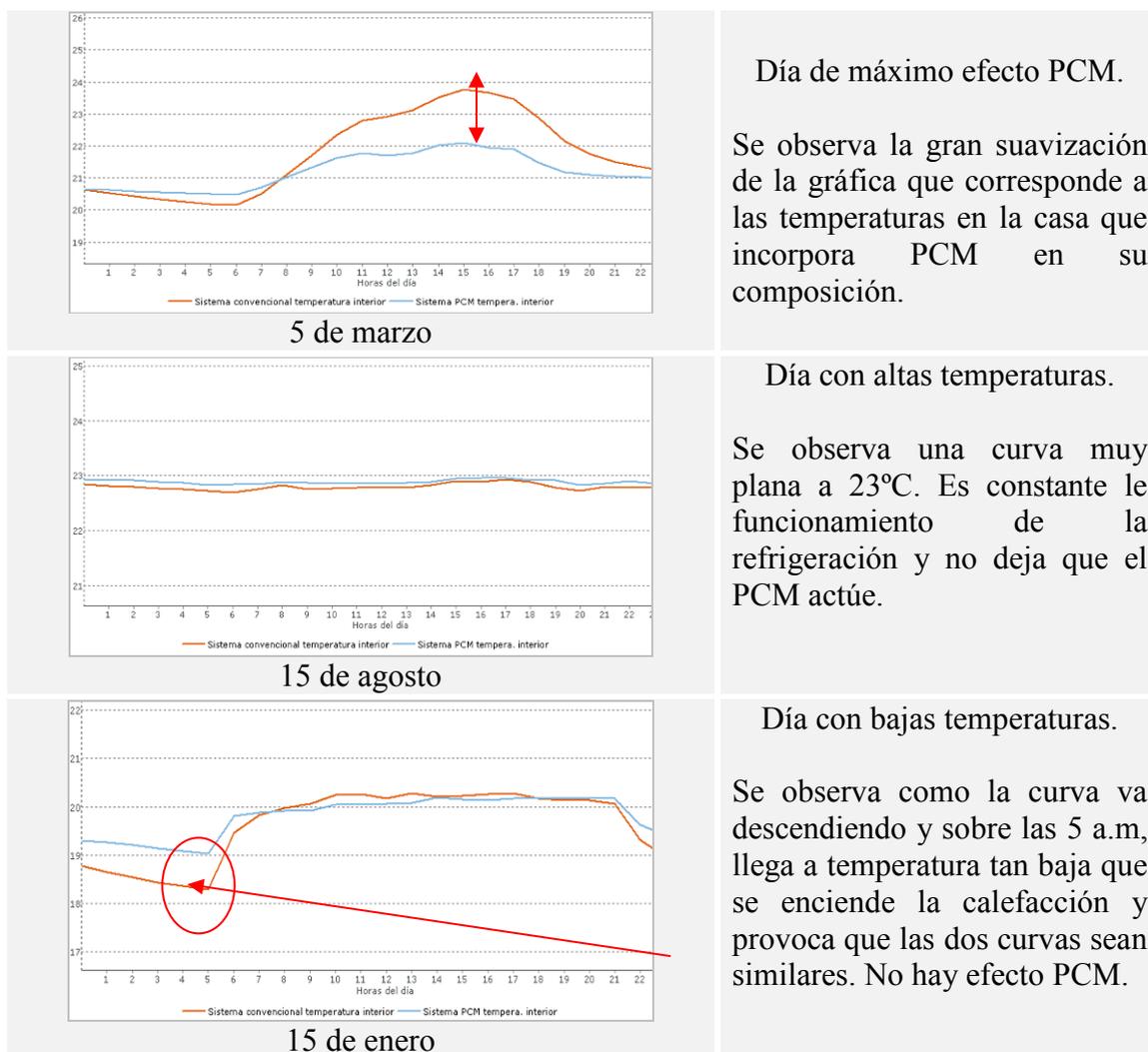
En el caso de clima cálido (Sevilla), se obtiene un 8.69% de ahorro en refrigeración y un 17.03% de ahorro en calefacción. Para el caso de clima frío (Soria), el resultado es de 10.26% en ahorro de calefacción y de 44.87% en refrigeración.

Estos resultados a primera vista no parecen lógicos. A continuación se detalla cada uno:

-Refrigeración: en clima cálido al subir la temperatura a 23°C se produce el cambio de fase con la correspondiente absorción de calor. Pero las temperaturas suben a valores y velocidad mayores que en el caso de clima frío. Este efecto provoca que en clima cálido el efecto PCM se sature rápido. En clima frío sin embargo, como las máximas temperaturas no subirán mucho más de 23°C, el material PCM mantiene el ambiente sin casi necesidad de encender la refrigeración.

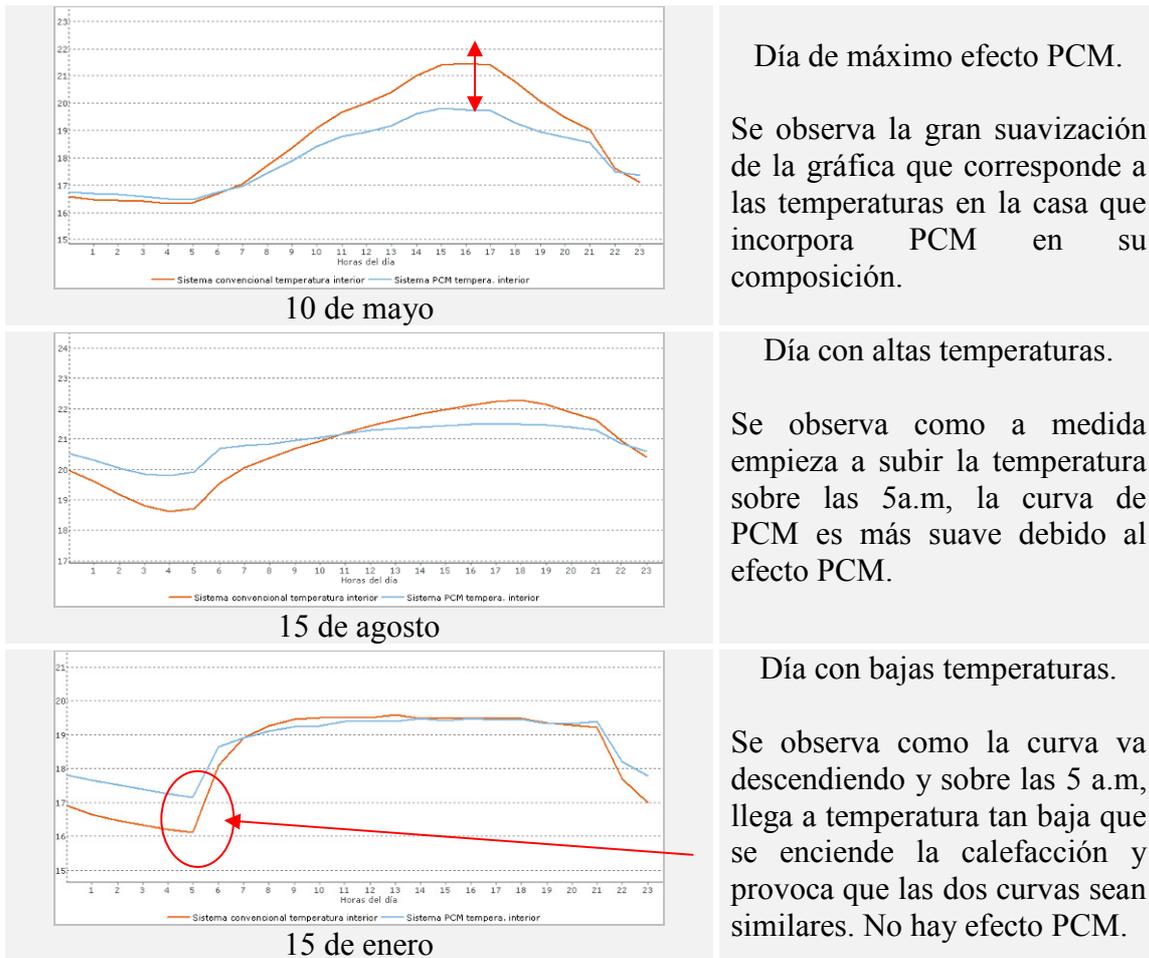
-Calefacción: el efecto es inverso. En clima frío durante el día el material PCM absorbe calor que cede al ambiente al llegar la noche. Pero debido a que las temperaturas caen de manera empicada, este efecto tiene poca duración y rápidamente aparece la necesidad de encender la calefacción. En clima cálido sin embargo, el calor que ha almacenado durante el día, como las temperaturas no descienden demasiado, al cederlo al ambiente durante la noche, puede provocar que no sea necesaria la calefacción.

Sevilla. (resultado de las simulaciones. ANEXO VII).



**Figura 75:** Comportamiento de tres días en clima cálido. (Sevilla).

Soria. (resultado de las simulaciones. ANEXO VII).



**Figura 76:** Comportamiento de tres días en clima cálido. (Soria).

## **Conclusiones.**

○ Existe un gran número de materiales de cambio de fase y debe escogerse detenidamente el más adecuado para cada aplicación (construcción, refrigeración, etc.). Las parafinas presentan características adecuadas para la construcción.

○ El SEM revela la morfología de los diferentes PCMs. En el caso de Micronal, el material está formado por esferas huecas, y las micro-cápsulas se agrupan sólo en la parte más exterior de ellas. El producto GR42, presenta la parafina sin encapsular sobre un soporte rico en silicio.

○ Los ensayos de DSC han permitido analizar el calor latente asociado a cada cambio de fase de los diferentes productos utilizados y estos valores se han usado posteriormente en la simulación numérica.

○ Mezclas de yeso: fácil mezclado sin modificar las condiciones de preparación del yeso convencional. No varía ni la calidad ni el tiempo del fraguado con ninguno de los PCMs utilizados.

○ Referente al comportamiento térmico, en todos los ensayos del laboratorio existe una mejora en todas las placas que contienen PCM. En concreto, la placa que mayor aplanamiento presenta en la curva, es con PCM DS5008X. Este hecho coincide con que en las curvas DSC, es el material PCM con el pico más estrecho y elevado.

○ En los ensayos mecánicos (flexo-tracción y compresión), realizados a probetas prismáticas, no se observa influencia negativa por la introducción de PCM en el yeso.

○ Mezclas de cemento: fácil mezclado sin modificar las condiciones de preparación del yeso convencional. No varía ni la calidad ni el tiempo del fraguado con ninguno de los PCMs utilizados. En este caso las mejoras en las condiciones térmicas son menores que en el caso de utilizar yeso, ya que el cemento presenta menor conductividad.

○ En el caso de la mezclas con polímeros termoestables, la homogeneidad es mala, quedando el PCM en la superficie del molde. El comportamiento térmico en el proceso de calentamiento es positivo, pero en el proceso de enfriamiento es casi nulo.

○ Se realiza un experimento con un cubículo con mezcla de yeso y tres tipos de PCM estudiados anteriormente. De ellos se confirma la influencia positiva de los PCM. En este caso la inercia térmica de la caja es mayor y en consecuencia también lo es la amortiguación de la amplitud de oscilación de la temperatura.

## Análisis de la viabilidad de usar materiales con PCM en edificación

- Las simulaciones numéricas permiten analizar la combinación de diferentes capas, variando sus grosores y características. De aquí se deduce que para lugares que se alcancen temperaturas elevadas (pasen los 41°C), la composición de pared que mejor funciona es la formada por GR42 en el exterior y Micronal en el interior. Esta combinación no tiene sentido si las caras exteriores de la pared no alcanzan esta temperatura.
- El análisis del coste energético en sistemas de climatización se ha realizado utilizando el programa PCM Express. Se ha observado que todas las incorporaciones de PCM influyen positivamente. En todos los casos la amortización de la inversión se conseguirá en menos de seis años.

**REFERENCIA**

- [1] B. Flaherty, Characterisation of waxes by differential scanning calorimetry, *J. Appl. Chem. Biotechnol.* 21 (1971).
- [2] C. Giavarini, F. Pochetti, Characterization of petroleum products by DSC analysis, *J. Thermal Anal.* 5 (1973) 83–94.
- [3] I.O. Salyer, A.K. Sircar, R.P. Chartoff, Analysis of crystalline paraffinic hydrocarbons for thermal energy storage by differential scanning calorimetry; Part 1, Pure hydrocarbons, 15th North American Thermal Analysis Society Conference, Cincinnati, OH, 1986.
- [4] M. Vukits, D. Jähnig; AEE INTEC. Project management: Barbara Droschel, IZES. Report on available products in passive cooling solutions.
- [5] Univ. Prof. Dr-Ing. M. N. Fisch, Dr.-Ing. L. Köhl. Institut für Gebäude- und Solartechnik (IGS) TU Braunschweig, Mühlentorstraße 23, D-38106 Braunschweig. Use of Microencapsulated Phase Change Materials in Office Blocks.
- [6] M. Telkes, Thermal storage for solar heating and cooling, Proceedings of the Workshop on Solar Energy Storage Subsystems for the Heating and Cooling of Buildings, Charlottesville (Virginia, USA), 1975.
- [7] H.G. Barkmann, F.C. Wessling, Use of buildings structural components for thermal storage, Proceedings of the Workshop on Solar Energy Storage Subsystems for the Heating and Cooling of Buildings, Charlottesville (Virginia, USA), 1975.
- [8] K.A.R. Ismail, J.R. Henríquez, Thermally effective windows with moving phase change material curtains, *Appl. Thermal Eng.* 21 (2001) 1909–1923. B. Zalba et al. / *Applied Thermal Engineering* 23 (2003) 251–283 281
- [9] K.A.R. Ismail, J.R. Henríquez, Parametric study on composite and PCM glass systems, *Energy Convers. Mgmt.* 43 (2002) 973–993.
- [10] I.O. Salyer, A.K. Sircar, Phase change materials for heating and cooling of residential buildings and other applications, Proceedings of the 25th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference—IECEC\_90, 1990.
- [11] P. Espeau, D. Mondieig, Y. Haget, M.A. Cuevas-Diarte, Active package for thermal protection of food products, *Packag. Technol. Sci.* 10 (1997) 253–260.
- [12] L.F. Cabeza, J. Roca, M. Nogues, B. Zalba, J.M. Marin, Transportation and conservation of temperature sensitive materials with phase change materials: state of the art, IEA ECES IA Annex 17 2nd Workshop, Ljubljana (Slovenia), 2002.
- [13] J. Bellettre, V. Sartre, F. Biais, A. Lallemand, Transient state study of electric motor heating and phase change solid–liquid cooling, *Appl. Thermal Eng.* 17 (1) (1997) [12] P. Blüher, Latentwärmespeicher erhöht den Fahrkomfort und die Fahrsicherheit, *ATZ Automobiltechnische Zeitschrift* 93 (1991) 3–8.
- [14] G.A. Lane, *Solar Heat Storage: Latent Heat Material*, vol. II, Technology, Florida, 1986.
- [15] S. Campos Maya. Incorporación de PCM en elementos constructivos para la mejora energética. (2010)
- [16] A. Oliver. Integración de materiales de cambio de fase en placas de yeso reforzadas con fibras de polipropileno. Aplicación a sistemas de refrigeración y calefacción pasivos para almacenamiento de calor latente en edificios. (2009)

**BIBLIOGRAFÍA**

[www.micronal.de](http://www.micronal.de)

[www.rubitherm.com](http://www.rubitherm.com)

[www.teappcm.com](http://www.teappcm.com)

[www.europeanthermodynamics.com](http://www.europeanthermodynamics.com)

[www.lowex.info/projekte/Importe/projekt08/FL\\_SmartBoard\\_e.pdf](http://www.lowex.info/projekte/Importe/projekt08/FL_SmartBoard_e.pdf)

**ANEXO I: EJEMPLOS DE SUSTANCIAS Y MEZCLAS QUE SE UTILIZAN COMO MATERIALES PCM.**

**Sustancias inorgánicas.**

Componentes	Temperatura fusión (°C)	Calor de fusión (kJ/kg)	Conductividad térmica (W/mK)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )
H <sub>2</sub> O	0	333,0	0,612	998 líquido 917 sólido
LiClO <sub>3</sub> _ 3H <sub>2</sub> O	8,1	253,0	-	1.720
CaCl <sub>2</sub> _ 6H <sub>2</sub> O	29	190,8	0,540 líquido 1,088 sólido	1.562 líquido 1.802 sólido
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> _ 10H <sub>2</sub> O	32,4	254,0	0,544	1.485
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> _ 10H <sub>2</sub> O	32-36	246,5	-	1.442
Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> _ 12H <sub>2</sub> O	35,5	265,0	-	1.522
Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> _ 5H <sub>2</sub> O	48	201,0	-	1.600 sólido 1.666 líquido
Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> _ 6H <sub>2</sub> O	89	162,8	0,490 líquido 0,502 sólido	1.550 líquido 1.636 sólido
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	854	275,7	2	2.533
KF	857	452,0	-	2.370
K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	897	235,8	2	2.290

**Fuente:** B. Zalba, J.M Marín, L.F Cabeza, H. Mehling. Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications. 2002

**Sustancias orgánicas.**

Componentes	Temperatura fusión (°C)	Calor de fusión (kJ/kg)	Conductividad térmica (W/mK)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )
Parafina C <sub>14</sub>	4,5	165	-	-
Parafina C <sub>15</sub> -C <sub>16</sub>	8	153	-	-
Polyglycol E400	8	99,6	0,187	1.125 líquido 1.228 sólido
Parafina C <sub>16</sub> -C <sub>18</sub>	20-22	152	-	-

## 2 ANEXO I: Ejemplo de sustancias y mezclas que se utilizan como PCM

Polyglycol E600	22	127,2	0,189	1.126 líquido 1.232 sólido
Parafina C <sub>13</sub> -C <sub>24</sub>	22-24	189	0,210	0,760 líquido 0,900 sólido
1-Dodecanol	26	200	-	-
Parafina C <sub>18</sub>	28	244	0,148 líquido 0,150 sólido	0,774 líquido 0,814 sólido
1-Tetradecanol	38	205	-	-
Parafina C <sub>16</sub> -C <sub>28</sub>	42-44	189	0,21 sólido	0,765 líquido 0,910 sólido
Parafina C <sub>20</sub> -C <sub>33</sub>	48-50	189	0,21 sólido	0,769 líquido 0,912 sólido
Parafina C <sub>22</sub> -C <sub>45</sub>	58-60	189	0,21 sólido	0,795 líquido 0,920 sólido
Polyglycol E6000	66	190,0	-	1.085 líquido 1.212 sólido
Parafina C <sub>21</sub> -C <sub>50</sub>	66-68	189	0,21 sólido	0,830 líquido 0,930 sólido
Biphenyl	71	119,2	-	991 líquido 1.166 sólido
Propionamide	79	168,2	-	-
Naphthalene	80	147,7	0,132 líquido 0,340 sólido	976 líquido 1.145 sólido
Erythritol	118	339,8	0,326 líquido 0,733 sólido	1.300 líquido 1.480 sólido

**Fuente:** B. Zalba, J.M Marín, L.F Cabeza, H. Mehling. Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications. 2002

### Mezclas no eutécticas de sustancias orgánicas. Ácidos grasos.

Componentes	Temperatura fusión (°C)	Calor de fusión (kJ/kg)	Conductividad térmica (W/mK)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )
Propyl palmiate	10	186	-	-
Isopropyl palmiate	11	95-100	-	-
Isopropyl stearate	14-18	140-142	-	-
Caprylic acid	16	148,5	0,149	901 líquido 981 sólido
Butyl stearate	19	140	-	-

Capric-lauric acid	21	143	-	-
Vinyl stearate	27-29	122	-	-
Capric acid	32	152,7	0,153	878 líquido 1.004 sólido
Methyl-12 hydroxy-stearate	42-43	120-126	-	-
Lauric acid	42-44	178	0,147	870 líquido 1.007 sólido
Myristic acid	49-51	204,5	-	861 líquido 990 sólido
Palmitic acid	64	185,4	0,162	850 líquido 989 sólido

**Fuente:** B. Zalba, J.M Marín, L.F Cabeza, H. Mehling. Review on termal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications. 2002



**ANEXO II: CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS DE PCM QUE SE COMERCIALIZAN EN EL MERCADO ACTUALMENTE.**

PARAFINAS DE CALOR LATENTE SIN ENCAPSULADO												
RUBITHERM	Punto de fusión (°C)	Zona de fusión (°C)	Zona de congelamiento. (°C)	Capacidad almacenamiento de calor. Rango 15-30°C. (kJ/kg)	Densidad sólido a 15°C. (kg/l)	Densidad líquido a 25°C. (kg/l)	Volumen de expansión en el rango de cambio de fase. (%)	Conductividad térmica. W/(m*K)	Viscosidad a 50°C. (mm <sup>2</sup> /s)	Punto de inflamación: PCM. (°C)	Corrosión	Amenaza para el agua
RT 21	21	18-23. Típico es: 21°C	22-19. Típico es 22°C	134	0.88	0.77	14	0.2	25.71	154	Químicament e inerte con la mayoría de los materiales.	Clase de peligro 1 (WGK)
RT 27	27	25-28. Típico es: 27°C	28-25. Típico es 27°C	184	0.88	0.76	16	0.2	26.32	164	Químicament e inerte con la mayoría de los materiales.	Clase de peligro 1 (WGK)
RT 31	29	27-31. Típico es: 29°C	31-27. Típico es 29°C	169	0.88	0.76	16	0.2	28.57	174	Químicament e inerte con la mayoría de los materiales.	Clase de peligro 1 (WGK)
RT 42	41	38-43. Típico es: 41°C	43-37. Típico es 42°C	174	0.88	0.76	16	0.2	30.93	>100	Químicament e inerte con la mayoría de los materiales.	Clase de peligro 1 (WGK)
RT 50	49	45-51. Típico es: 49°C	51-46. Típico es 50°C	168	0.88	0.76	16	0.2	31.20	>100	Químicament e inerte con la mayoría de los materiales.	Clase de peligro 1 (WGK)

Fuente: [www.rubitherm.com](http://www.rubitherm.com)

## 2 ANEXO II: Características físicas y químicas de PCM que se comercializan en el mercado actualmente.

PARAFINAS DE CALOR LATENTE ENCAPSULADAS										
BASF	Punto de fusión. (°C)	Rango de aplicación. (°C)	Capacidad almacenamiento de calor. (kJ/kg)	Capacidad de calor latente (kJ/kg)	Tipo de producto	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Densidad aparente (kg/m <sup>3</sup> )	Viscosidad (mPas)	Estabilidad de volumen. (%)	Durabilidad
DS 5001	26	10-30	145	110	Polvo	-	2.5-3.5	-	Encapsulado	>10.000 ciclos
DS 5008	23	10-30	135	100	Polvo	-	2.5-3.5	-	Encapsulado	>10.000 ciclos
DS 5029	21	10-30	125	90	Polvo	-	2.5-3.5	-	Encapsulado	>10.000 ciclos

Fuente: [www.micronal.de](http://www.micronal.de)

SALES HIDRATADAS SIN ENCAPSULADO											
RUBITHERM	Punto de fusión. (°C)	Zona de fusión. (°C)	Zona de congelamiento. (°C)	Capacidad almacenamiento de calor. (kJ/kg)	Densidad sólido a 15°C. (kg/l)	Densidad líquido a 35°C. (kg/l)	Volumen de expansión.	Conductividad térmica. W/(m*K)	Viscosidad a 55°C (mm <sup>2</sup> /s)	Corrosión	Amenaza para el agua
SP 22 A17	22	22-24. Típico es: 23°C	21-19. Típico es 20°C	(Rango 13-28°C)150	1.49	1.43	ΔT 20°C. (%) 4.03	0.6	111.1	Corrosivos en comparación con el metal	Clase de peligro 1 (WGK).
SP25 A8	25	26	25	(Rango 15-30°C)180	(Densidad a -15°C) 1.38		(1/K). 0.001	0.6	Adelgazamiento por corte	-	-

Fuente: [www.rubitherm.com](http://www.rubitherm.com)

SALES HIDRATADAS ENCAPSULADAS									
TEAP	Cambio de fase (°C)	Subcomisión de refrigeración (°C)	Peso específico	Calor latente práctico. (J/gr)	Calor latente teórico. (J/gr)	Calor específico aproximado en PCM. (J/gr/°C)	Conductividad térmica. (W/m/°C)	Estabilidad térmica. (ciclos)	Máxima temperatura de funcionamiento (°C)
18T	17-19	Máximo 2	1.48-1.50	175	188	2	1	>10.000	100
20T	19-20	Máximo 2	1.48-1.50	175	188	2	1	>10.000	100
25T	24-26	Máximo 2	1.48-1.50	175	188	2	1	>10.000	100
29T	28-30	Máximo 2	1.48-1.50	175	188	2	1	>10.000	100
32S	31-32	Mínima	1.45	230	>200	2	0.6	>10.000	100
34S	33-34	Mínima	1.45	250	>220	2	0.6	>10.000	100
36S	36	Mínima	1.45	260	>230	2	0.6	>10.000	100
48S	31-32	Mínima	1.45	260	>230	2	0.6	>10.000	100
TEAP	Cambio de fase (°C)	Rango de temperatura (°C)	Capacidad de liberación aproximado con el agua.	Calor latente práctico. (Wh/l)	Calor sensible sólido. (Wh/°C)	Calor sensible líquido. (Wh/°C)	Estabilidad térmica.	Máxima temperatura de funcionamiento (°C)	
TH29	29	26-32	29 veces más	79	0.67	0.99	Con aditivos	45	
TH58	58	55-61	13 veces más	80.7	1.12	1.63	Con aditivos	75	
TH89	89	86-92	10 veces más	63.3	0.84	1.29	Con aditivos	105	

Fuente: [www.teappcm.com](http://www.teappcm.com)



RUBITHERM	Tipo de material	Ligado a otro material	Punto de fusión. (°C)	Área de fusión. (°C)	Capacidad almacenamiento de calor. (kJ/kg)	Calor específico. (kJ/kg°K)	Densidad a granel. (kg/l)	Conductividad térmica. (W/m°K)	Volumen de expansión. (%)	Punto de inflamación del PCM. (°C)	Temperatura de funcionamiento máxima. (°C)	Corrosión
<b>GR42 (0.2-0.6)</b>	Parafina	Sílice	41	38-43	57	1.5	0.849	0.2	No	190	70	Químicamente inerte
<b>GR42 (1-3)</b>	Parafina	Sílice	41	38-43	57	1.5	0.800	0.2	No	190	70	Químicamente inerte
<b>GR50 (0.2-0.6)</b>	Parafina	Sílice	49	45-51	55	1.5	0.849	0.2	No	190	70	Químicamente inerte
<b>GR50 (1-3)</b>	Parafina	Sílice	41	38-43	55	1.5	0.849	0.2	No	190	70	Químicamente inerte
<b>GR82 (0.2-0.6)</b>	Parafina	Sílice	82	77-85	58	1.5	0.800	0.2	No	270	110	Químicamente inerte
<b>GR82 (1-3)</b>	Parafina	Sílice	82	77-84	58	1.5	0.800	0.2	No	270	110	Químicamente inerte

Fuente: [www.rubitherm.com](http://www.rubitherm.com) / [www.micronal.de](http://www.micronal.de) / [www.climator.com](http://www.climator.com)



**ANEXO III: DESCRIPCIÓN DE ENSAYOS REALIZADOS A PCM Y A MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN CON PCM EN SU COMPOSICIÓN.**

**Microscopio electrónico.**

Lo primero es preparar las muestras que se quieren observar. Como en los tres casos se trata de material granulado (GR42) o micro encapsulado (DS5001X, DS 5008X), se ha adherir a la pieza soporte que se introduce en el microscopio. Para ello se coloca una pegatina de grafito (material conductor) que pega el soporte y el material de la muestra.

Además, hay que realizar un recubrimiento con oro (deposición catódica), para garantizar que la muestra sea conductora. Este recubrimiento no influye en la imagen.



Soporte para las muestras



Pegatinas de grafito



Pistola de silicona



Pintura de plata



Muestra DS 5001X



Muestra DS 5008X



Muestra GR42



Muestras en polvo



Muestras en trozos

## 2 ANEXO III: Descripción de ensayos realizados a PCM y a materiales de construcción con PCM en su composición.



Microscopio electrónico



Mandos del microscopio electrónico

**Tabla 1:** resumen fotográfico del material necesario para la observación con microscopio electrónico.

### Rotura de mini-placas a esfuerzos mecánicos.

Esta prensa se compone de un cuerpo y un ordenador conectado a una caja de registros de datos. En la prensa se sitúa el pistón, la célula de carga, los ensayos de deformación y los apoyos que sujetan y entran en carga la placa. En la caja de registro de datos, se sitúa el control del tipo de célula, escala, velocidad, carga y mandos que dirigen el movimiento del pistón. En el programa se lleva a cabo un registro de las variables del ensayo, así como del proceso de toma y almacenamiento de datos.

La prensa que realiza los ensayos lo hace conforme la norma UNE EN 196-1, es norma para cementos. Pero esta norma cumple con todas las restricciones de la norma de ensayos mecánicos para yesos que es la UNE EN 13279-2.

### Ensayo a flexo-tracción.

Para llevar a cabo el ensayo, se coloca la mini-placa de forma que las caras que están en contacto con los planos de la prensa, sean las caras que lo han estado con el molde.

Para los ensayos de flexo-tracción la placa apoya en dos puntos situado cada uno en un borde quedando la parte central sin apoyo. Estos apoyos están separados 10cm. Cuando comience el ensayo, el pistón la presionará en un solo punto central en la



Rotura a flexo-tracción

ANEXO III: Descripción de ensayos realizados a PCM y a materiales de construcción con PCM en su composición. 3

parte superior, provocando así la rotura de la mini-placa en el centro del vano. El resultado que nos aporta el monitor de la prensa, es el máximo valor en toneladas que ha aguantado la pieza antes de romper.

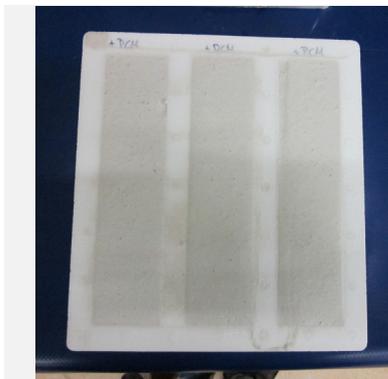
Ensayos a compresión.

Los doce trozos resultantes de las seis mini-placas rotas a esfuerzos de flexo-tracción, se ensayan ahora a compresión. Estas se colocan igual, con las caras que estuvieron en contacto con el molde, colocadas en contacto con los planos de la prensa.

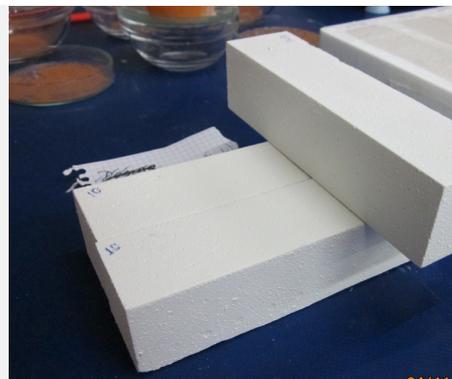
En este ensayo, el pistón comprime superiormente la pieza contra un único apoyo inferior con las mismas dimensiones que el superior, hasta que la pieza rompe haciéndose añicos. El resultado que nos aporta el monitor de la prensa, es el máximo valor en toneladas que ha aguantado la pieza antes de romper.



Rotura compresión



Mini-placas en el molde.



Mini-placas desmoldadas.



Mini-placas en la nevera



Mini-placas en la estufa



Prensa hidráulica



Monitor de control

**Tabla 2:** resumen fotográfico del material necesario para los ensayos mecánicos.



**ANEXO IV: CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES TERMOESTABLES.**

**Plásticos termoestables.**

Los polímeros termoestables, termofraguantes o termorígidos son aquellos que solamente son blandos o "plásticos" al calentarlos por primera vez. Una vez se enfrían, adquieren esa forma y no pueden volver a tener consistencia blanda o moldeable.

Esto se debe a su estructura molecular, de forma reticular tridimensional. En otras palabras, constituyen una red con enlaces transversales.

Cuando a un preparado base se le añade un catalizador. Se crea una reacción exotérmica que activa el tipo de enlace que les proporciona esta propiedad.

Características:

- Material compacto y duro
- Fusión dificultosa (la temperatura los afecta muy poco)
- Insoluble para la mayoría de los solventes
- Crecimiento molecular en proporción geométrica frente a la reacción de polimerización.

Clasificación de los materiales termoestables:

- Resinas fenólicas
- Resinas ureicas
- Resinas de melamina
- Resinas de poliéster
- Resinas epoxídicas

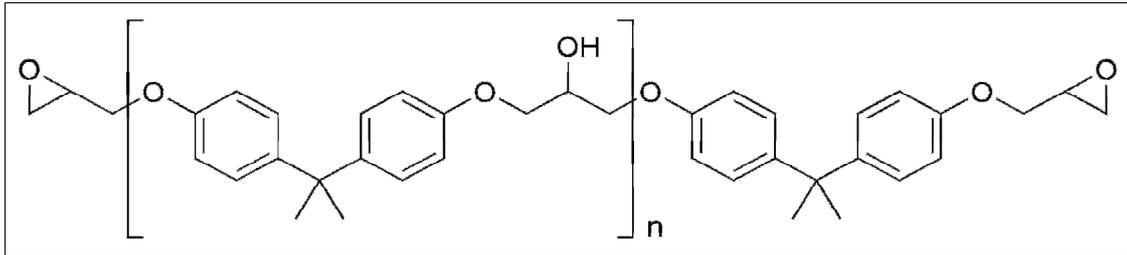
**Resinas epoxídicas.**

Se obtienen por reacción del difenilolpropano y la epiclorhidrina. Según las cantidades en que se adicionan los constituyentes y las condiciones en que se efectúan las reacciones se obtienen resinas sólidas, viscosas o líquidas.

Son característicos los grupos epóxidos, muy reactivos, comprendidos en la molécula mientras es un material termoplástico. Desaparecen durante el endurecimiento. Son, en pocas palabras, termoplásticos endurecidos químicamente.



## 2 ANEXO IV: Características de los materiales termoestables.



**Figura 1:** Cadena de moléculas de la resina epoxídica.

Estructura. n indica el número de subunidades polimerizadas y se encuentra en el rango de 0 hasta casi 25.

### Propiedades y características generales:

- No desprenden gases durante su endurecimiento
- El material no se contrae una vez terminado el proceso de endurecimiento
- Se emplean puras o diluidas con carga.
- Una vez endurecidas, se adhieren a casi todos los cuerpos
- Se utilizan a temperatura ambiente o algo más elevada
- Buena resistencia mecánica
- Buena resistencia a los agentes químicos

### Usos en construcción:

- Adhesivos. Se considera que los adhesivos epoxídicos son, después de los naturales, los más consumidos en el mundo, en cualquiera de sus formas y aplicaciones.
- Barnices aislantes
- Recubrimientos varios: pantallas metálicas, elementos activos de máquinas eléctricas, piezas de conexión eléctricas, etc.

Estas resinas epoxi son estudiadas por la ocupación específica que tienen y las posibilidades que presentan:

Las resinas epoxi pueden modificarse de acuerdo al uso previsto, mediante la adición de "cargas" o refuerzos de fibras.

**Resinas de poliéster.**

Se obtienen por poliesterificación de poliácidos con polialcoholes. Ácido tereftálico, Pentaeritrita, Glicerina, Ácido maleico.

Características y aplicaciones:

- Elevada rigidez dieléctrica
- Buena resistencia a las corrientes de fuga superficiales
- Buena resistencia a la humedad
- Buena resistencia a los disolventes
- Buena resistencia al arco eléctrico
- Excelente estabilidad dimensional
- Arden con dificultad y con un humo muy negro

Usos en construcción:

- Para aplicaciones resistentes al fuego (M1, F0). Con altos contenidos de aditivos de alúmina hidratada permite obtener excelentes propiedades frente al fuego y baja emisión de humos.
- Para aplicaciones donde se desee fabricar laminados de alta resistencia química con fibras de refuerzo, fundamentalmente de vidrio. Ideal para construir tanques, tuberías y chimeneas.
- Resina de poliéster insaturada de tipo ortoftálica de alta reactividad, con un bajo pico exotérmico y una baja contracción volumétrica. Recomendada para la producción de mármol aglomerado u hormigón polímero.
- Resina de poliéster insaturado de tipo ortoftálica, tixotrópica y preacelerada. Ideal para la fabricación de laminados con fibras de vidrio tipo malla o tejidos. Se trata de una resina para usos generales, que posee certificación para aplicaciones donde el laminado esté en contacto con alimentos y para fabricación de piezas de uso general.
- Clima cálido: Sería como protección solar como lamas...





**ANEXO V: PROGRAMAS CREADOS CON LENGUAJE FORTRAN, PARA REALIZACIÓN DE SIMULACIONES.**

En primer lugar se expone el programa utilizado para la simulación de las condiciones térmicas para la placa de yeso.

**1. Programa para la placa de yeso.**

```
implicit double precision (a-h,o-z). PARAMETER(n=38,ntemper=600)
dimension T(0:n+1)
dimension der2(n)
dimension pref(n)
```

```
open(unit=10,file='yeso.dat',status='old')
open(unit=11,file='Yeso.txt',status='old')
open(21,file='perfil.out',status='unknown')
open(41,file='Tc.out',status='unknown')
```

```
read(10,*) nhor
read(10,*) dncm
read(10,*) dncs
read(10,*) dt
read(10,*) dx
```

```
difus=0.214
difus=difus/1000000.d0
fact=difus/dx/dx
```

```
T1=50.
T2=10.
do i=0,n+1
T(i)=T1
enddo
ndata=int(dncm*60./dncs+0.5)
niter=int(dncs/dt+0.5)
time=0.
do ih=1,nhor
do it=1,ndata
read(11,*)tiemporeal,Text,tint
T(0)=Text
T(n+1)=Text
do iter=1,niter
time=time+dt
do i=1,n
der2(i)=T(i+1)+T(i-1)-2.*T(i)
```

```

enddo
do i=1,n
T(i)=T(i)+dt*fact*der2(i)
enddo
enddo
write(41,*)time/60.,T(n/2)
enddo
do i=0,n+1
write(21,*)dx*float(i),T(i)
enddo
write(21,*)'/*'
enddo
end

```

## **2. Programa para la placa de yeso + %PCM. (datos a partir de los DSC)**

En los siguientes programas, la obtención de los valores de  $C_e$ , se obtiene de la lectura de los datos de los DSC para cada PCM. Los datos que se encuentran en color rojo indican que son los parámetros que se cambian de una simulación a otra.

implicit double precision (a-h,o-z). PARAMETER(n=38)

```

dimension T(0:n+1)
dimension der2(n)
dimension pref(n)
dimension calS(300),calB(300)

open(unit=10,file='yeso.dat',status='old')
open(unit=11,file='5001.txt',status='old')
open(unit=12,file='aj_5001_1S.dat',status='old')
open(unit=13,file='aj_5001_1B.dat',status='old')
open(21,file='Nperfil.out',status='unknown')
open(41,file='NTc5001.1.out',status='unknown')

read(10,*) nhor
read(10,*) dncm
read(10,*) dnCS
read(10,*) dt
read(10,*) dx

do ij=1,300
read(12,*)tt1,calor
if(calor.lt.1.)then
calS(ij)=0.
else
calS(ij)=calor
endif

```

```
read(13,*)tt1,calor
if(calor.lt.1.)then
calB(ij)=0.
else
calB(ij)=calor
endif
enddo

tmax=dfloat(nhor*dncm)*60.
write(*,*)'tmax: ',tmax

porcyeso=0.93
porcPCM=0.07
ce=1667.d0
difus=0.24d0

read(11,*)tiemporeal,Text,tint
T(0)=Text
T(n+1)=Text
T1=tint
do i=1,n
T(i)=T1
enddo
do i=1,n
der2(i)=0.
enddo
ndata=int(dncm*60./dncs+0.5)
niter=int(dncs/dt+0.5)
time=0.
do ih=1,nhor
do it=1,ndata
do iter=1,niter
time=time+dt
do i=1,n
Tx=T(i)
if(Tx.lt.40.)then
if(time.lt.tmax/2.)then
nindex=int(tx*10.+0.5)-100
CPCM=calB(nindex)*1000.
else
nindex=int(tx*10.+0.5)-100
CPCM=calS(nindex)*1000.
endif
else
energ=0.
endif
energ=CPCM*porcPCM+CGR42*porcGR42
cocient=ce/(ce+energ)
pref(i)=difus*cocient/1000000.
enddo
```

```
do i=1,n
der2(i)=T(i+1)+T(i-1)-2.*T(i)
enddo
do i=1,n
x=float(i)
fact=pref(i)/dx/dx
T(i)=T(i)+dt*fact*der2(i)
enddo
enddo
read(11,*)tiemporeal,Text,tint
T(0)=Text
T(n+1)=Text
write(41,*)time/60.,T(n/2)
enddo
do i=0,n+1
write(21,*)dx*float(i),T(i)
enddo
write(21,*)/*'
enddo
end
```

### **3. Programa para las simulaciones de la caja yeso.**

```
PARAMETER(n=40,ntemper=600)

dimension T(0:n+1)
dimension der2(n)
dimension pref(n)

open(unit=10,file='yeso.dat',status='old')
open(unit=11,file='Caja_ yeso.txt',status='old')
open(21,file='perfil.out',status='unknown')
open(41,file='Tccaja_ yeso.out',status='unknown')

read(10,*) nhor
read(10,*) dncm
read(10,*) dnsc
read(10,*) dt
read(10,*) dx

difus=0.214
difus=difus/1000000.d0
fact=difus/dx/dx

T1=60.
T2=10.

do i=0,n+1
```

```
T(i)=T1
enddo
ndata=int(dncm*60./dncs+0.5)
niter=int(dncs/dt+0.5)
time=0.
do ih=1,nhor
do it=1,ndata
read(11,*)tiemporeal,Text,tint
T(0)=Text
T(n+1)=Text
do iter=1,niter
time=time+dt

do i=1,n
der2(i)=T(i+1)+T(i-1)-2.*T(i)
enddo
do i=1,n
T(i)=T(i)+dt*fact*der2(i)
enddo
enddo
write(41,*)time/60.,T(n/2)
enddo
do i=0,n+1
write(21,*)dx*float(i),T(i)
enddo
write(21,*)/*'
enddo
end
```

#### **4. Programa para las simulaciones de la caja yeso + PCM.**

```
implicit double precision (a-h,o-z). PARAMETER(n=33)
dimension T(0:n+1)
dimension der2(n)
dimension pref(n)
dimension calS(500),calB(500)
dimension calS2(300),calB2(300)

open(unit=10,file='caja.dat',status='old')
open(unit=11,file='caja_pcm.txt',status='old')
open(unit=12,file='aj_GR42_1S.dat',status='old')
open(unit=13,file='aj_GR42_1B.dat',status='old')
open(unit=14,file='aj_mezcla_1S.dat',status='old')
open(unit=15,file='aj_mezcla_1B.dat',status='old')
open(21,file='Nperfil.out',status='unknown')
open(41,file='NTcaja_pcm.1.out',status='unknown')

read(10,*) nhor
read(10,*) dncm
read(10,*) dnscs
```

```
read(10,*) dt  
read(10,*) dx
```

```
do ij=1,500  
read(12,*)tt1,calor  
if(calor.lt.0.2)then  
calS(ij)=0.  
else  
calS(ij)=calor  
endif  
read(13,*)tt1,calor  
if(calor.lt.0.2)then  
calB(ij)=0.  
else  
calB(ij)=calor  
endif  
enddo  
do ij=1,300  
read(14,*)tt1,calor  
if(calor.lt.1.)then  
calS2(ij)=0.  
else  
calS2(ij)=calor  
endif  
read(15,*)tt1,calor  
if(calor.lt.1.)then  
calB2(ij)=0.  
else  
calB2(ij)=calor  
endif  
enddo
```

```
tmax=dfloat(nhor*dncm)*60.  
write(*,*)'tmax: ',tmax
```

```
porcyeso=0.535  
porcPCM=0.107  
porcGR42=0.267  
ce=1742.  
difus=0.24
```

```
read(11,*)tiemporeal,Taint,Tsint,Tint,Tsext  
T(0)=Tsext  
T(n+1)=Tsint  
T1=tint  
do i=1,n  
T(i)=T1  
enddo  
do i=1,n  
der2(i)=0.
```

```

enddo
ndata=int(dncm*60./dncs+0.5)
niter=int(dncs/dt+0.5)
write(*,*)ndata,niter,niter*ndata*nhor
time=0.

do ih=1,nhor
do it=1,ndata
do iter=1,niter
time=time+dt
do i=1,n
Tx=T(i)
if(Tx.lt.60.)then
if(time.lt.tmax/2.)then
nindex=int(tx*10.+0.5)-100
CGR42=calB(nindex)*1000.
CPCM=calB2(nindex)*1000.
else
nindex=int(tx*10.+0.5)-100
CGR42=calS(nindex)*1000.
CPCM=calS2(nindex)*1000.
endif
else
CGR42=0.
endif
energ=CPCM*porcPCM+CGR42*porcGR42
cocient=ce/(ce+energ)
pref(i)=difus*cocient/1000000.
enddo
do i=1,n
der2(i)=T(i+1)+T(i-1)-2.*T(i)
enddo
do i=1,n
x=float(i)
fact=pref(i)/dx/dx
T(i)=T(i)+dt*fact*der2(i)
enddo
enddo

read(11,*)tiemporeal,Taint,Tsint,Tint,Tsxt
T(0)=Tsxt
T(n+1)=Tsint
write(41,*)time/60.,T(n/2)
enddo
do i=0,n+1
write(21,*)dx*float(i),T(i)
enddo
write(21,*)'/*'
enddo
end

```

### **5. Programa para las simulaciones de las mezclas DS5001X y DS 5008X**

```
implicit double precision (a-h,o-z)PARAMETER(n=38)
```

```
dimension T(0:n+1)
dimension der2(n)
dimension pref(n)
dimension calS(300),calB(300)
```

```
open(unit=10,file='yeso.dat',status='old')
open(unit=11,file='5%.txt',status='old')
open(unit=12,file='aj_mezcla_1S.dat',status='old')
open(unit=13,file='aj_mezcla_1B.dat',status='old')
open(21,file='Nperfil.out',status='unknown')
open(41,file='NTc5%.1.out',status='unknown')
```

```
read(10,*) nhor
read(10,*) dncm
read(10,*) dnsc
read(10,*) dt
read(10,*) dx
```

```
do ij=1,300
read(12,*)tt1,calor
if(calor.lt.1.)then
calS(ij)=0.
else
calS(ij)=calor
endif
read(13,*)tt1,calor
if(calor.lt.1.)then
calB(ij)=0.
else
calB(ij)=calor
endif
enddo
```

```
tmax=dfloat(nhor*dncm)*60.
write(*,*)'tmax: ',tmax
```

```
porcyeso=0.93
porcPCM=0.07
```

```
ce=1681.d0
difus=0.24d0
```

```
read(11,*)tiemporeal,Text,tint
T(0)=Text
T(n+1)=Text
T1=tint
```

```
do i=1,n
T(i)=T1
enddo
do i=1,n
der2(i)=0.
enddo
ndata=int(dncm*60./dncs+0.5)
niter=int(dncs/dt+0.5)
time=0.
do ih=1,nhor
do it=1,ndata
do iter=1,niter
time=time+dt
do i=1,n
Tx=T(i)
if(Tx.lt.40.)then
if(time.lt.tmax/2.)then
nindex=int(tx*10.+0.5)-100
CPCM=calB(nindex)*1000.
else
nindex=int(tx*10.+0.5)-100
CPCM=calS(nindex)*1000.
endif
else
energ=0.
endif
energ=CPCM*porcPCM+CGR42*porcGR42
cocient=ce/(ce+energ)
pref(i)=difus*cocient/1000000.
enddo
do i=1,n
der2(i)=T(i+1)+T(i-1)-2.*T(i)
enddo
do i=1,n
x=float(i)
fact=pref(i)/dx/dx
T(i)=T(i)+dt*fact*der2(i)
enddo
enddo
read(11,*)tiemporeal,Text,tint
T(0)=Text
T(n+1)=Text
write(41,*)time/60.,T(n/2)
enddo
do i=0,n+1
write(21,*)dx*float(i),T(i)
enddo
write(21,*)'/*'
enddo
end
```

## **6. Programa para las simulaciones de las paredes formadas por capas.**

```
implicit double precision (a-h,o-z).PARAMETER(n=80)
```

```
dimension T(0:n+1)
dimension der2(n)
dimension pref(n)
dimension calS(500),calB(500)
dimension calS2(500),calB2(500)
```

```
open(unit=10,file='capas.dat',status='old')
open(unit=11,file='yeso60C.txt',status='old')
open(unit=12,file='aj_GR42_1S.dat',status='old')
open(unit=13,file='aj_GR42_1B.dat',status='old')
open(unit=14,file='aj_mezcla_1S.dat',status='old')
open(unit=15,file='aj_mezcla_1B.dat',status='old')
```

```
open(21,file='Nperfil.out',status='unknown')
open(41,file='NTcapas.out',status='unknown')
open(42,file='NTcapas_N4.out',status='unknown')
open(43,file='NTcapas_N8.out',status='unknown')
```

```
read(10,*) nhor
read(10,*) dncm
read(10,*) dnCS
read(10,*) dt
read(10,*) dx
```

```
n1=n*7,5/16
n2=n*9/16
write(*,*)n1,n2
```

```
do ij=1,500
read(12,*)tt1,calor
if(calor.lt.0.2)then
calS(ij)=0.
else
calS(ij)=calor
endif
read(13,*)tt1,calor
if(calor.lt.0.2)then
calB(ij)=0.
else
calB(ij)=calor
endif
enddo
do ij=1,300
read(14,*)tt1,calor
if(calor.lt.1.)then
calS2(ij)=0.
```

```
else
calS2(ij)=calor
endif
read(15,*)tt1,calor
if(calor.lt.1.)then
calB2(ij)=0.
else
calB2(ij)=calor
endif
enddo
do ij=301,500
calS2(ij)=0.
calB2(ij)=0.
enddo
```

```
tmax=dfloat(nhor*dncm)*60.
write(*,*)'tmax: ',tmax
```

```
c  porcentajes capa 1 - GR42
c  porcyeso_1=0.599
c  porcPCM_1=0.
c  porcGR42_1=0.401
   porcyeso_2=0.0
   porcPCM_2=0.
   porcGR42_2=1.
   ce_2=1742.d0
c  porcentajes capa 2 - mezcla
c  porcyeso_2=0.86
c  porcPCM_2=0.14
c  porcGR42_2=0.
   porcyeso_1=0.
   porcPCM_1=0.
   porcGR42_1=1.
   ce_1=2010.d0
```

```
difus=0.24
```

```
c      read(11,*)tiemporeal,Text,tint
c      T(0)=Text
c      T(n+1)=Text
      T(0)=10.
      T(n+1)=10.
c      T1=tint
      do i=1,n
c      T(i)=T1
      T(i)=60.
      enddo
```

```
do i=1,n
der2(i)=0.
```

```
enddo
ndata=int(dncm*60./dncs+0.5)
niter=int(dncs/dt+0.5)
write(*,*)ndata,niter,niter*ndata*nhor
time=0.
do ih=1,nhor
do it=1,ndata
do iter=1,niter
time=time+dt
do i=1,n1
Tx=T(i)
if(Tx.lt.60.)then
if(time.lt.tmax/2.)then
nindex=int(tx*10.+0.5)-100
CGR42=calB(nindex)*1000.
CPCM=calB2(nindex)*1000.
else
nindex=int(tx*10.+0.5)-100
CGR42=calS(nindex)*1000.
CPCM=calS2(nindex)*1000.
endif
else
CGR42=0.
CPCM=0.
endif
energ=CPCM*porcPCM_1+CGR42*porcGR42_1
cocient=ce_1/(ce_1+energ)
pref(i)=difus*cocient/1000000.
enddo
do i=n1+1,n2
Tx=T(i)
if(Tx.lt.60.)then
if(time.lt.tmax/2.)then
nindex=int(tx*10.+0.5)-100
CGR42=calB(nindex)*1000.
CPCM=calB2(nindex)*1000.
else
nindex=int(tx*10.+0.5)-100
CGR42=calS(nindex)*1000.
CPCM=calS2(nindex)*1000.
endif
else
CGR42=0.
CPCM=0.
endif
energ=CPCM*porcPCM_2+CGR42*porcGR42_2
cocient=ce_2/(ce_2+energ)
pref(i)=difus*cocient/1000000.
enddo
```

```
do i=n2+1,n
Tx=T(i)
if(Tx.lt.60.)then
if(time.lt.tmax/2.)then
nindex=int(tx*10.+0.5)-100
CGR42=calB(nindex)*1000.
CPCM=calB2(nindex)*1000.
else
nindex=int(tx*10.+0.5)-100
CGR42=calS(nindex)*1000.
CPCM=calS2(nindex)*1000.
endif
else
CGR42=0.
CPCM=0.
endif
energ=CPCM*porcPCM_1+CGR42*porcGR42_1
cocient=ce_1/(ce_1+energ)
pref(i)=difus*cocient/1000000.
enddo
do i=1,n
der2(i)=T(i+1)+T(i-1)-2.*T(i)
enddo
do i=1,n
x=float(i)
fact=pref(i)/dx/dx
T(i)=T(i)+dt*fact*der2(i)
enddo
enddo
T(0)=10.
T(n+1)=10.
else
T(0)=60.
T(n+1)=60.
endif
write(41,*)time/60.,T(n/2)
write(42,*)time/60.,T(n*7/16)
write(43,*)time/60.,T(n*7/32)
enddo
do i=0,n+1
write(21,*)dx*float(i),T(i)
enddo
write(21,*)
enddo
end
```



**ANEXO VI: NORMATIVA APLICADA A LA VIVIENDA CREADA EN EL PROGRAMA PCM EXPRESS.**

**1. INSTALACIONES TÉRMICAS.**

**El CTE:** "Los edificios dispondrán de instalaciones térmicas apropiadas destinadas a proporcionar el bienestar térmico de sus ocupantes. Esta exigencia se desarrolla actualmente en el vigente Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios, RITE, y su aplicación quedará definida en el proyecto del edificio"

**R.D 1826/2009 el 27 noviembre con entrada en vigor el 12/12/2009:**

-Limita las temperaturas a 21°C para calefacción y 26°C para refrigeración, para edificios y locales destinados a: administrativo, comercial, pública concurrencia (culturales, actividades recreativas, restauración, transporte de personas y sus estaciones)

-Queda prohibida la instalación de calderas:

a) Calderas individuales a gas de hasta 70 kW de tipo atmosférico a partir del uno de enero de 2010.

b) Calderas estándar que tengan rendimientos a potencia nominal (donde Pn vendrá expresada en kW) y al 30% de carga parcial, inferiores a los que se indican a continuación a partir del uno de enero de 2010:

c) Calderas estándar que tengan rendimientos a potencia nominal (donde Pn vendrá expresada en kW) y al 30% de carga parcial, inferiores a los que se indican a continuación a partir del uno de enero de 2012.

**2. VENTILACIÓN.**

**El CTE HS3:**

Las cocinas deben disponer de un sistema adicional específico de ventilación con extracción mecánica para los vapores y los contaminantes de la cocción. Para ello debe disponerse un extractor conectado a un conducto de extracción independiente

de los de la ventilación general de la vivienda que no puede utilizarse para la extracción de aire de locales de otro uso. Cuando este conducto sea compartido por varios extractores, cada

uno de éstos debe estar dotado de una válvula automática que mantenga abierta su conexión con el conducto sólo cuando esté funcionando o de cualquier otro sistema antirrevoco.

Las aberturas de extracción deben conectarse a conductos de extracción y deben disponerse a una distancia del techo menor que 200 mm y a una distancia de cualquier rincón o esquina vertical mayor que 100 mm.

Un mismo conducto de extracción puede ser compartido por aseos, baños, cocinas y trasteros. Las cocinas, comedores, dormitorios y salas de estar deben disponer de un sistema complementario de ventilación natural. Para ello debe disponerse una ventana exterior practicable o una puerta exterior.

### Viviendas

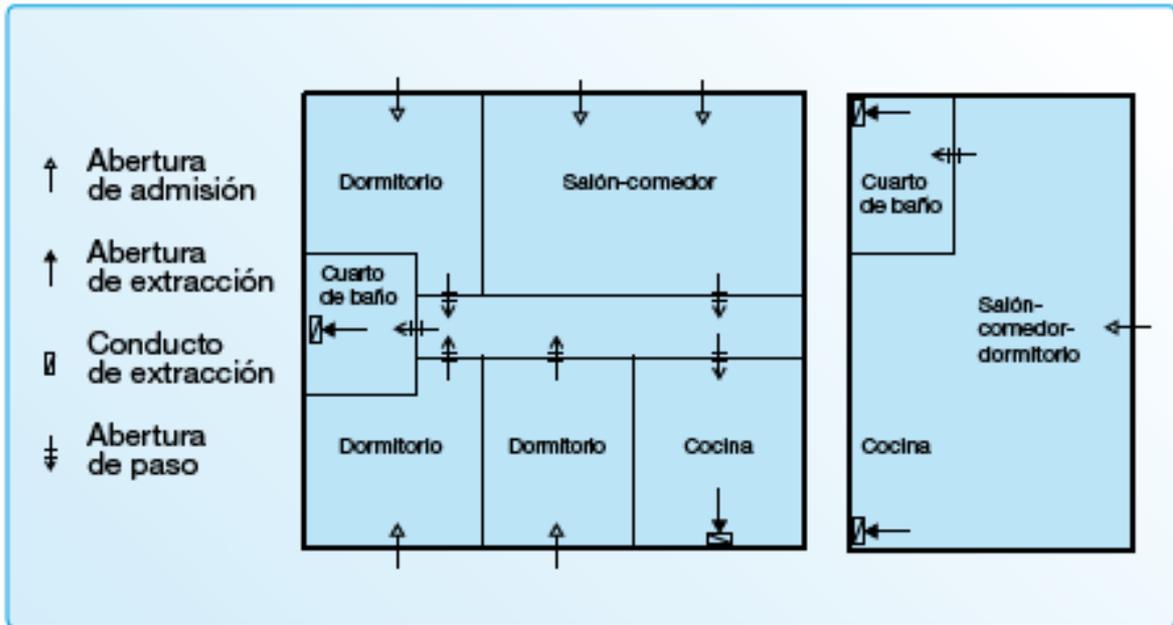
Las viviendas deben disponer de un sistema general de ventilación que puede ser híbrida o mecánica con las siguientes características (véanse los ejemplos de la figura):

El aire debe circular desde los locales secos a los húmedos, para ello los comedores, los dormitorios y las salas de estar deben disponer de aberturas de admisión; los aseos, las cocinas y los cuartos de baño deben disponer de aberturas de extracción; las particiones situadas entre los locales con admisión y los locales con extracción deben disponer de aberturas de paso.

Los locales con varios usos de los del punto anterior, deben disponer en cada zona destinada a un uso diferente de las aberturas correspondientes. Como aberturas de admisión, se dispondrán aberturas dotadas de aireadores o aperturas fijas de la carpintería, como son los dispositivos de microventilación con una permeabilidad al aire según UNE EN 12207:2000 en la posición de apertura de clase 1 o superior; no obstante, cuando las carpinterías exteriores sean de clase 1 de permeabilidad al aire según UNE EN 12207:2000 pueden considerarse como aberturas de admisión las juntas de apertura.

Cuando la ventilación sea híbrida las aberturas de admisión deben comunicar directamente con el exterior. Los aireadores deben disponerse a una distancia del suelo mayor que 1,80 m. Cuando algún local con extracción esté compartimentado, deben disponerse aberturas de paso entre los compartimentos; la abertura de extracción debe disponerse en el compartimento más contaminado que, en el caso de aseos y cuartos de baños, es aquel en el que está situado el inodoro, y en el caso de cocinas es aquel en el que está situada la zona de cocción; la abertura

de paso que conecta con el resto de la vivienda debe estar situada en el local menos contaminado.





**ANEXO VII: RESULTADOS OBTENIDOS DE CADA SIMULACIÓN CREADA CON**  
**EL PROGRAMA PCM EXPRESS**

**1. SEVILLA**

**Datos proyecto**

---

Lugar del objeto	Sevilla
Datos climáticos (base de la simulación)	Sevilla

Los resultados se basan en una comparación entre un sistema PCM y un sistema convencional (sin PCM).

---

**. Técnica doméstica**

---

	<b>Sistema PCM</b>	<b>Sistema convencional</b>
<b>Ventilación</b>		
Ventilación natural con ventanas	existente	existente
Ventilación mecánica	existente	existente
Ventilación noche de verano	existente	existente
Recuperación de calor	existente	existente
Transmisor geotérmico	No disponible	No disponible
<b>Técnica calefactora</b>		
Descenso nocturno	existente	existente
Temperatura funcionamiento	21°C	21°C
Periodo calefactora	1/11- 31/3	1/11- 31/3
Potencia de radiadores	80 W/m2	80 W/m2
Calefactora superficies	No disponible	No disponible
Registro calefac. en sistema ventilación	existente	existente
<b>Técnica refrigeración</b>		
Técnica refrigeración	existente	existente
Temperatura funcionamiento	26°C	26°C
Dato ref. a temperatura nominal	absoluto	absoluto
Fuente de frío	Aparato 2 compo.	Aparato 2 compo.
Potencia frigorífica máxima	100 W/m2	100 W/m2

---

## 2 ANEXO VII: Resultados obtenidos de cada simulación creada con el programa PCM EXPRESS

### 1.1 Cara interior.

#### Smartboard 21.

##### Parámetros espaciales.

---

###### **Espacio compuesto 1**

Frecuencia del compuesto: 1

###### **Espacio 1**

Longitud: 10 m  
Anchu.: 10 m  
Altu.: 2 m  
Altura de techo: 2 m  
Pared con altura de techo: 2  
Alineación pared 1: Sur  
Mobiliario: normal  
Tipo de uso: Vivienda Unifamiliar Aislada

###### **Suelo**

Construcción: Losa  
Situación montaje: en contacto con terreno

###### **Pared 1**

Construcción del sistema convencional: Pared ext. ladri. macizo  
Construcción del sistema PCM: Pared ext. ladri. macizo Smartboard 21 activo  
Situación montaje: al aire exterior  
Ventana: existente  
Superficie ventana: 22,5 %  
Factor de sombreado: 0,5  
Tipo ventana: Ventana doble estándar

###### **Pared 2**

Construcción del sistema convencional: Pared ext. ladri. macizo  
Construcción del sistema PCM: Pared ext. ladri. macizo Smartboard 21 activo  
Situación montaje: al aire exterior  
Ventana: existente  
Superficie ventana: 22,5 %  
Factor de sombreado: 0,5  
Tipo ventana: Ventana doble estándar

###### **Pared 3**

Construcción del sistema convencional: Pared ext. ladri. macizo  
Construcción del sistema PCM: Pared ext. ladri. macizo Smartboard 21 activo  
Situación montaje: al aire exterior  
Ventana: no disponible

---

**Pared 4**

Construcción del sistema convencional:	Pared ext. ladri. macizo
Construcción del sistema PCM:	Pared ext. ladri. macizo Smartboard 21 activo
Situación montaje:	al aire exterior
Ventana:	existente
Superficie ventana:	17,5 %
Factor de sombreado:	0,5
Tipo ventana:	Ventana doble estándar

**Tejado**

Construcción del sistema convencional:	Tejado inclinado
Construcción del sistema PCM:	Tejado inclinado Smartboard 21 activo
Situación montaje:	al aire exterior
Ventana:	no disponible

**Rentabilidad**

	<b>Sistema PCM</b>	<b>Sistema convencional</b>
<b>Inversiones</b>		
Inversión total:	8000 € (para 20 a)	7000 € (para 20 a)
<b>Costes variables</b>		
Costes calor:	0,12 €/kWh	0,12 €/kWh
Calor necesario determinado:	814,07 kWh/a	979,41 kWh/a
Costes frío:	0,12 €/kWh	0,12 €/kWh
Frío necesario determinado:	2973,23 kWh/a	3192,43 kWh/a
Otros:	0 €	0 €
Costes explotación:	0 % de las inversiones	2 % de las inversiones
<b>Carestía</b>		
Costes calor:	10 %	
Costes frío:	7 %	
Inversiones:	2 %	
Costes explotación:	4 %	
<b>Condi. marginales</b>		
Otros:	2 %	
Interés:	2 %	
Tiempo de observación:	20 a	

**Resultado de la rentabilidad**

Tiempo de amortización	5,1 años
Valor de capital	4141,56 euros
Réditos	28,84 %

**Tabla 1:** resultados de la rentabilidad de utilizar el sistema Smartboard 21.

#### 4 ANEXO VII: Resultados obtenidos de cada simulación creada con el programa PCM EXPRESS

##### Dinero acumulado (euros & años)

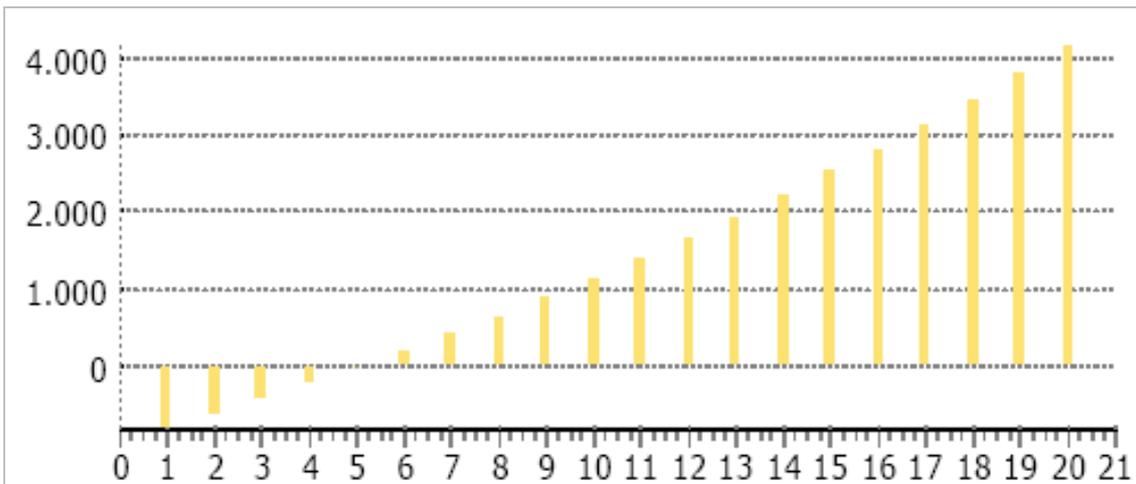


Figura 1: dinero acumulado en cada año por el uso del sistema Smartboard 21.

##### Representación de la rentabilidad

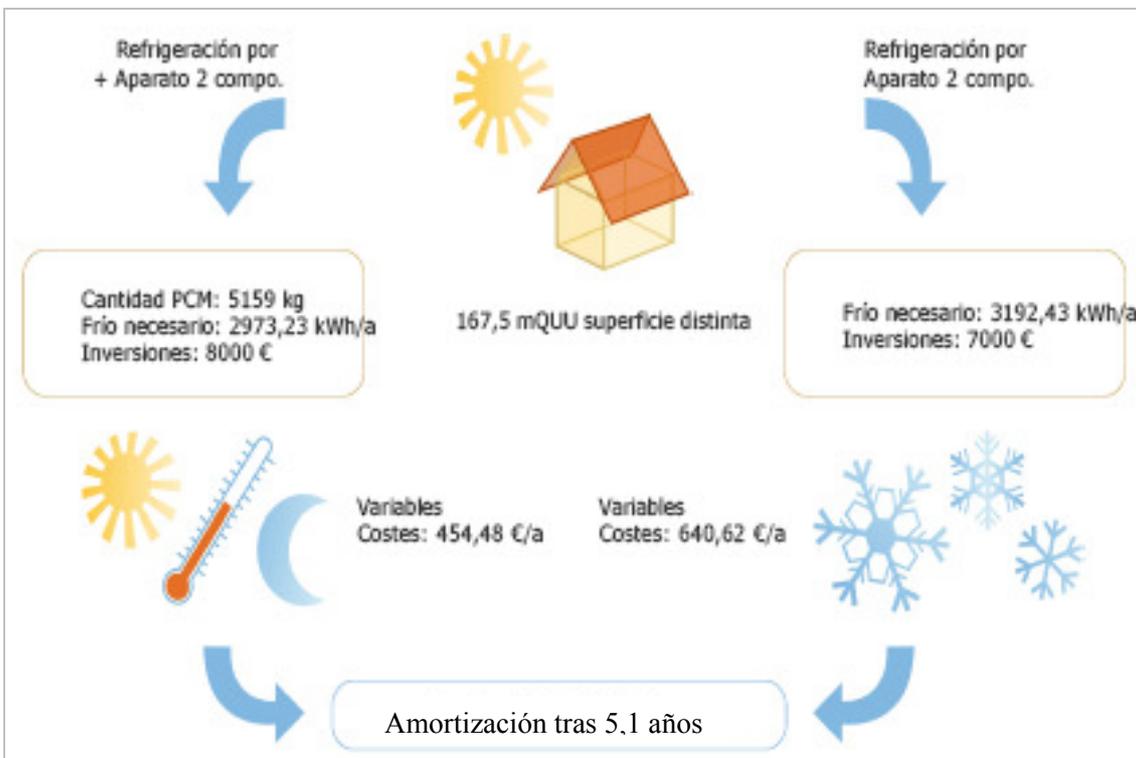
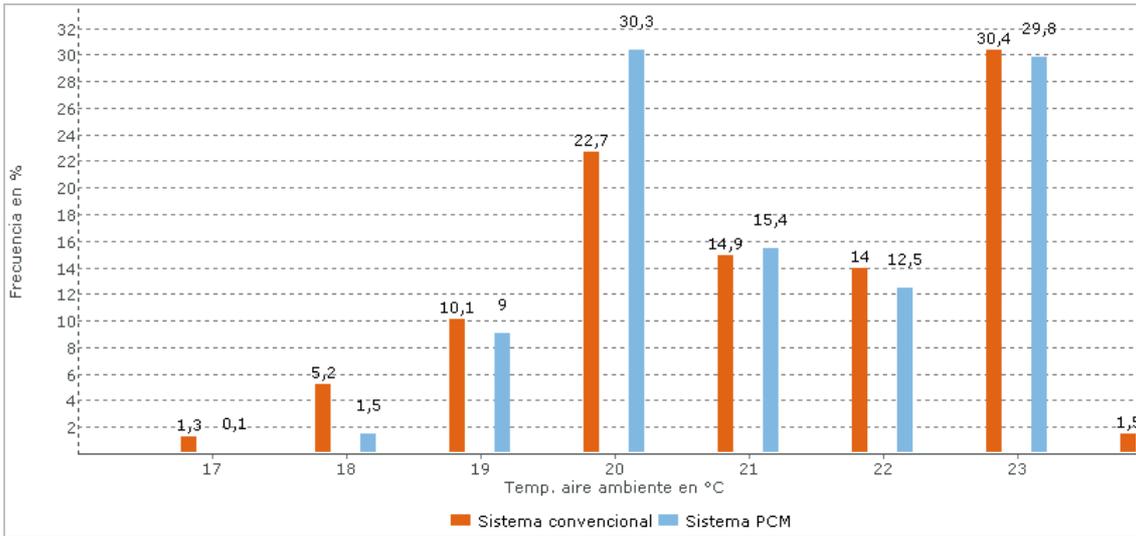


Figura 2: representación de la rentabilidad por el uso del sistema Smartboard 21.

**Datos de las temperaturas ambiente.**



**Temperaturas en el margen de confort (21-26°C)**

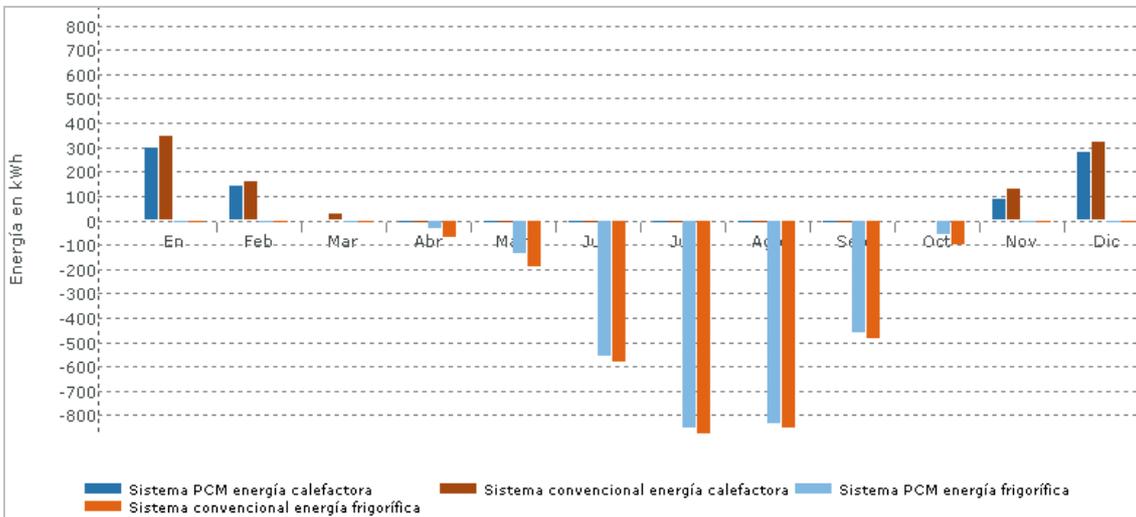
Sistema convencional 60,8% (5.326 h)	Sistema PCM 59% (5.168 h)
---	------------------------------

**Temperaturas superiores al margen de confort (>26°C)**

Sistema convencional 0% (0 h)	Sistema PCM 0% (0 h)
----------------------------------	-------------------------

Figura 3: porcentaje de la frecuencia de permanencia de las temperaturas ambientales.

**Datos de los gastos de energía.**



**Valor anual acumulado de energía calorífica**

Sistema convencional 979,41 kW/h	Sistema PCM 814,07 kW/h (-16,9%)
-------------------------------------	-------------------------------------

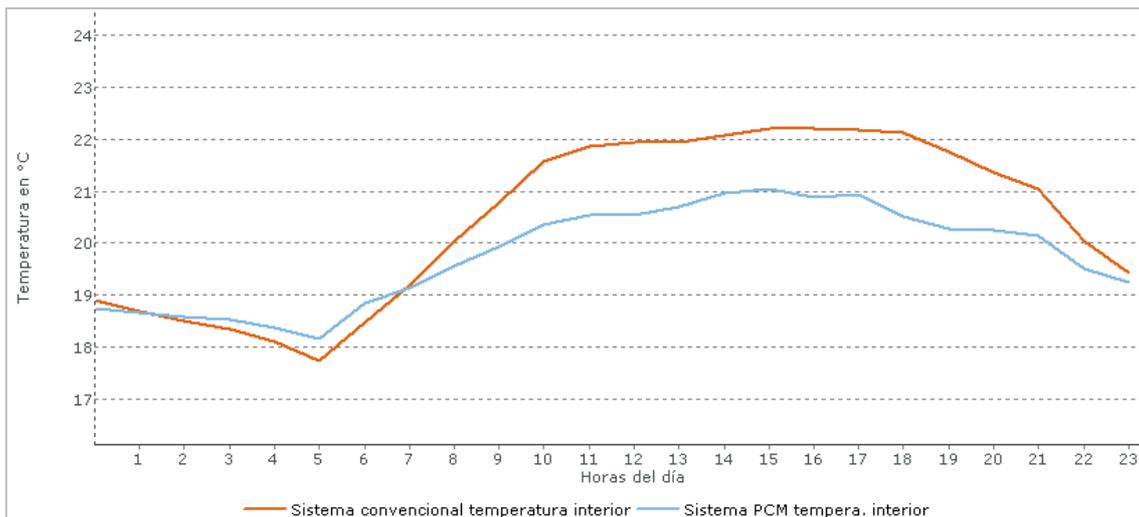
**Valor anual acumulado de energía frigorífica**

Sistema convencional 3.192,43 kW/h	Sistema PCM 2.973,23 kW/h (-6,9%)
---------------------------------------	--------------------------------------

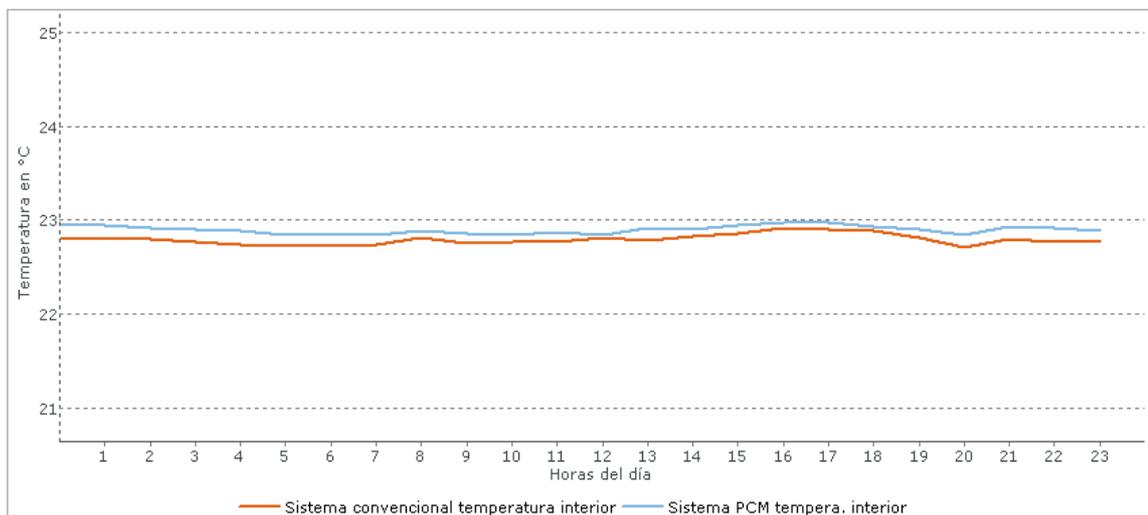
Figura 4: valores de los gastos de energía con sistema convencional y sistema PCM.

## 6 ANEXO VII: Resultados obtenidos de cada simulación creada con el programa PCM EXPRESS

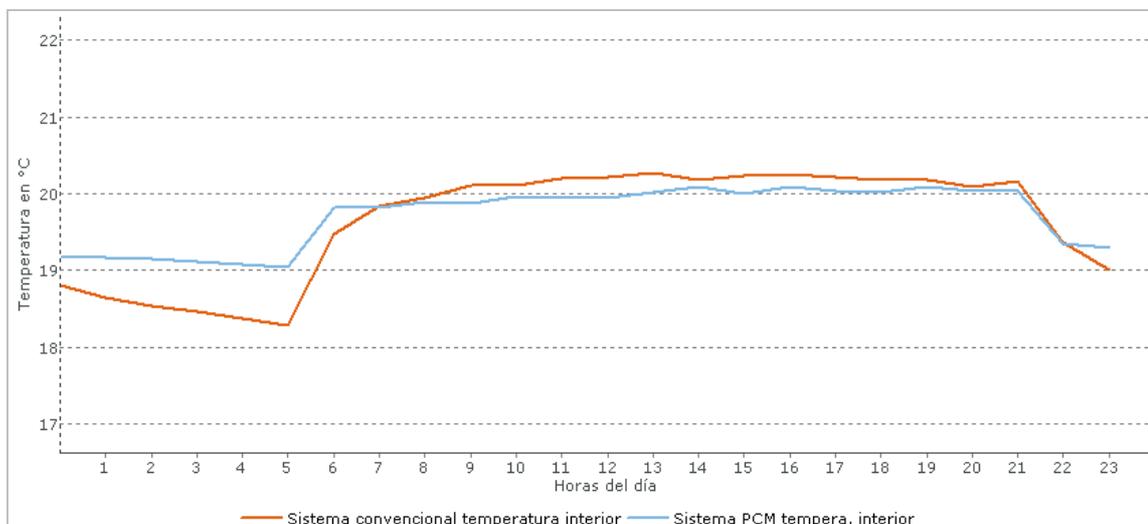
### Datos de las temperaturas en un día.



**Figura 5:** comparativa de las temperaturas ambientales. Día 3 de mayo.



**Figura 6:** comparativa de las temperaturas ambientales. Día 15 de agosto.



**Figura 7:** comparativa de las temperaturas ambientales. Día 15 de enero.

## Smartboard 23.

### Parámetros espaciales.

---

#### **Espacio compuesto 1**

Frecuencia del compuesto: 1

#### **Espacio 1**

Longitud: 10 m

Anchu.: 10 m

Altu.: 2 m

Altura de techo: 2 m

Pared con altura de techo: 2

Alineación pared 1: Sur

Mobiliario: normal

Tipo de uso: Vivienda Unifamiliar Aislada

#### **Suelo**

Construcción: Losa

Situación montaje: en contacto con terreno

#### **Pared 1**

Construcción del sistema convencional: Pared ext. ladri. macizo

Construcción del sistema PCM: Pared ext. ladrillo macizo Smartboard 23 pasivo

Situación montaje: al aire exterior

Ventana: existente

Superficie ventana: 22,5 %

Factor de sombreado: 0,5

Tipo ventana: Ventana doble estándar

#### **Pared 2**

Construcción del sistema convencional: Pared ext. ladri. macizo

Construcción del sistema PCM: Pared ext. ladrillo macizo Smartboard 23 pasivo

Situación montaje: al aire exterior

Ventana: existente

Superficie ventana: 22,5 %

Factor de sombreado: 0,5

Tipo ventana: Ventana doble estándar

#### **Pared 3**

Construcción del sistema convencional: Pared ext. ladri. macizo

Construcción del sistema PCM: Pared ext. ladrillo macizo Smartboard 23 pasivo

Situación montaje: al aire exterior

Ventana: no disponible

---

## 8 ANEXO VII: Resultados obtenidos de cada simulación creada con el programa PCM EXPRESS

### Pared 4

Construcción del sistema convencional:	Pared ext. ladri. macizo
Construcción del sistema PCM:	Pared ext. ladrillo macizo Smartboard 23 pasivo
Situación montaje:	al aire exterior
Ventana:	existente
Superficie ventana:	17,5 %
Factor de sombreado:	0,5
Tipo ventana:	Ventana doble estándar

### Tejado

Construcción del sistema convencional:	Tejado inclinado
Construcción del sistema PCM:	Tejado muy inclinado Smartboard 23 pasivo
Situación montaje:	al aire exterior
Ventana:	no disponible

## Rentabilidad

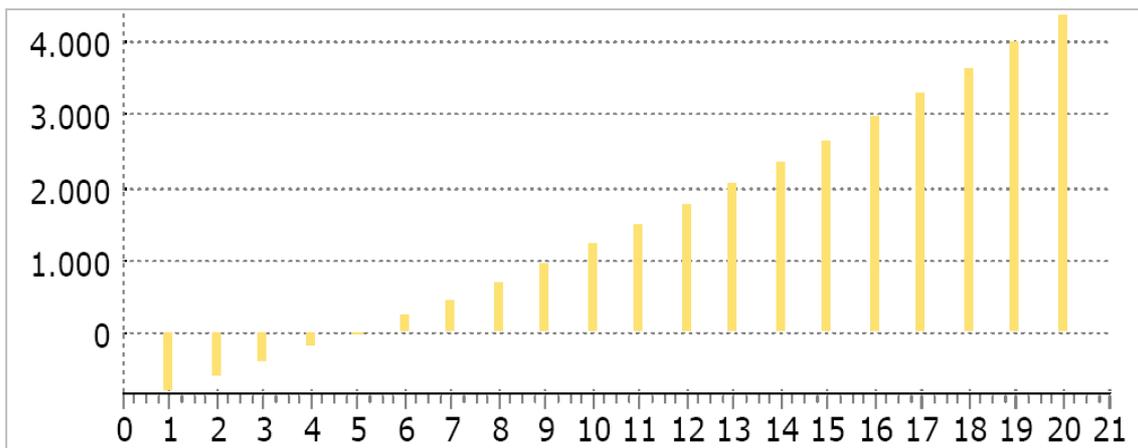
	Sistema PCM	Sistema convencional
<b>Inversiones</b>		
Inversión total:	8000 € (para 20 a)	7000 € (para 20 a)
<b>Costes variables</b>		
Costes calor:	0,12 €/kWh	0,12 €/kWh
Calor necesario determinado:	812,64 kWh/a	979,41 kWh/a
Costes frío:	0,12 €/kWh	0,12 €/kWh
Frío necesario determinado:	2915,08 kWh/a	3192,43 kWh/a
Otros:	0 €	0 €
Costes explotación:	0 % de las inversiones	2 % de las inversiones
<b>Carestía</b>		
Costes calor:	10 %	
Costes frío:	7 %	
Inversiones:	2 %	
Costes explotación:	4 %	
<b>Condi. marginales</b>		
Otros:	2 %	
Interés:	2 %	
Tiempo de observación:	20 a	

### Resultado de la rentabilidad

Tiempo de amortización	4,9 años
Valor de capital	4377,58 euros
Réditos	30,17 %

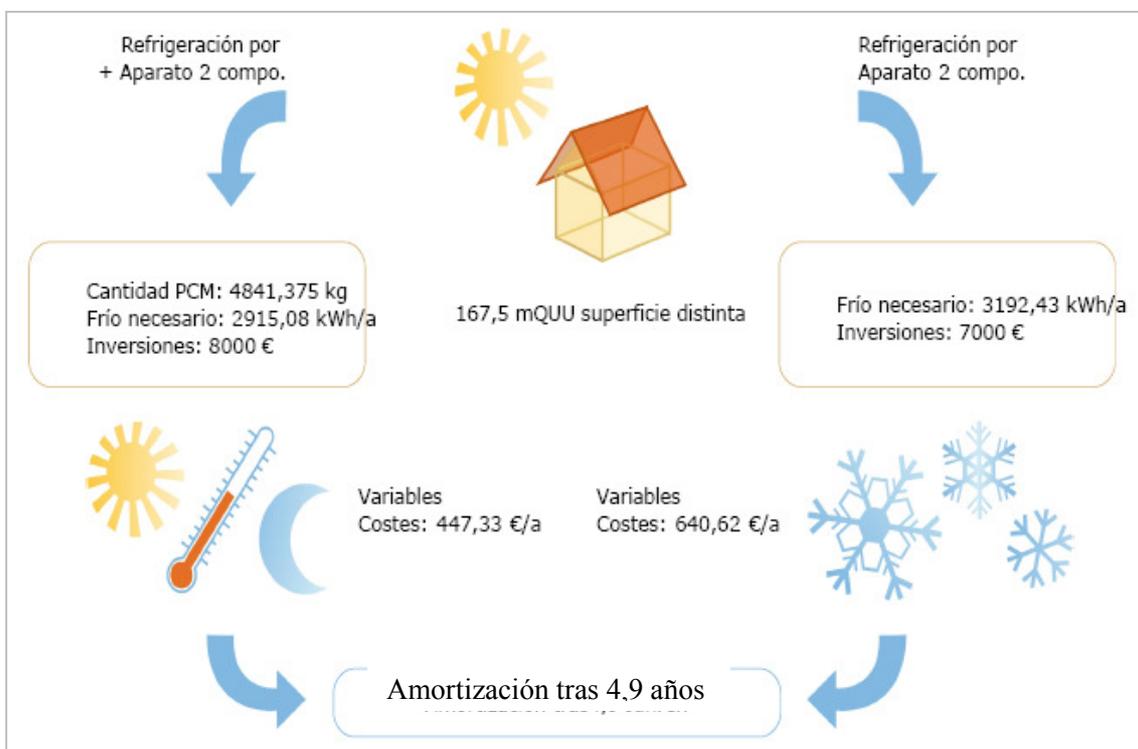
**Tabla 2:** resultados de la rentabilidad de utilizar el sistema Smartboard 23.

### Dinero acumulado (euros & años)



*Figura 8:* dinero acumulado en cada año por el uso del sistema Smartboard 23.

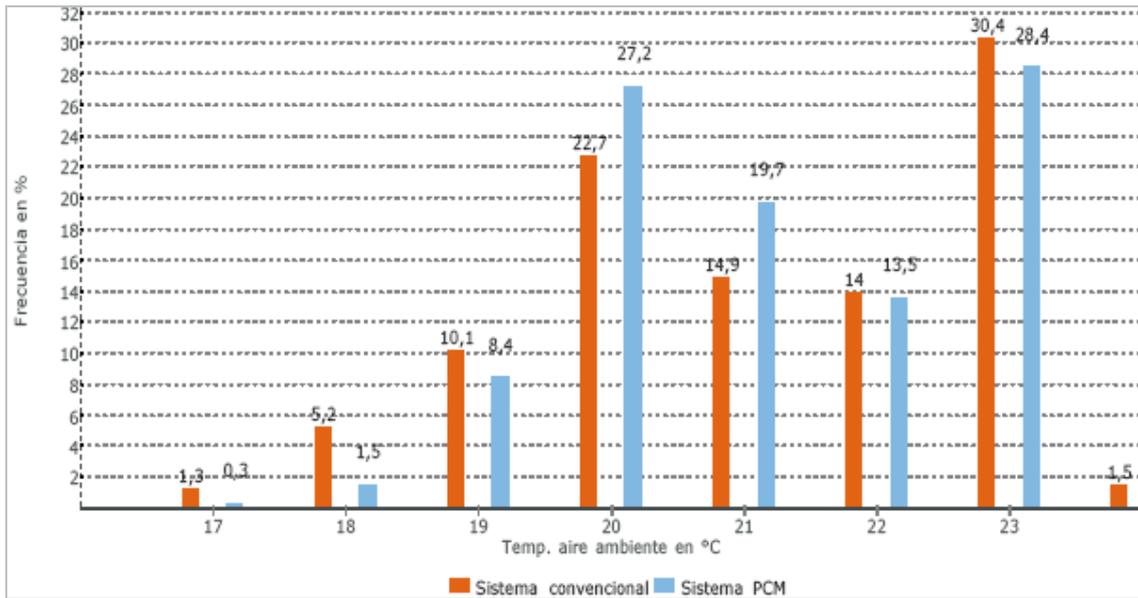
### Representación de la rentabilidad



*Figura 9:* representación de la rentabilidad por el uso del sistema Smartboard 23.

## 10 ANEXO VII: Resultados obtenidos de cada simulación creada con el programa PCM EXPRESS

### Datos de las temperaturas ambiente.



#### Temperaturas en el margen de confort (21-26°C)

Sistema convencional  
60,8% (5.326 h)

Sistema PCM  
62,6% (5.484 h)

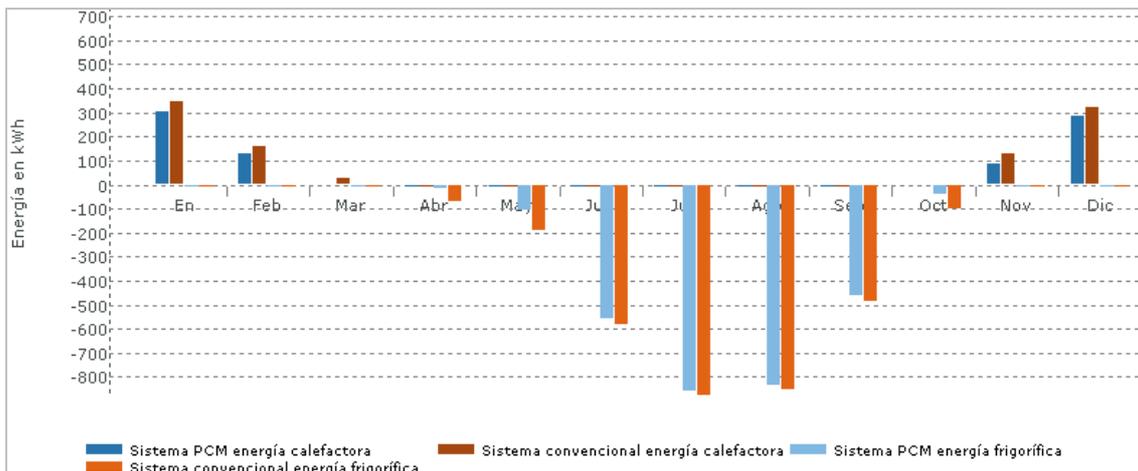
#### Temperaturas superiores al margen de confort (>26°C)

Sistema convencional  
0% (0 h)

Sistema PCM  
0% (0 h)

Figura 10: porcentaje de la frecuencia de permanencia de las temperaturas ambientales.

### Datos de los gastos de energía.



#### Valor anual acumulado de energía calorífica

Sistema convencional  
979,41 kW/h

Sistema PCM  
812,64 kW/h (-16,9%)

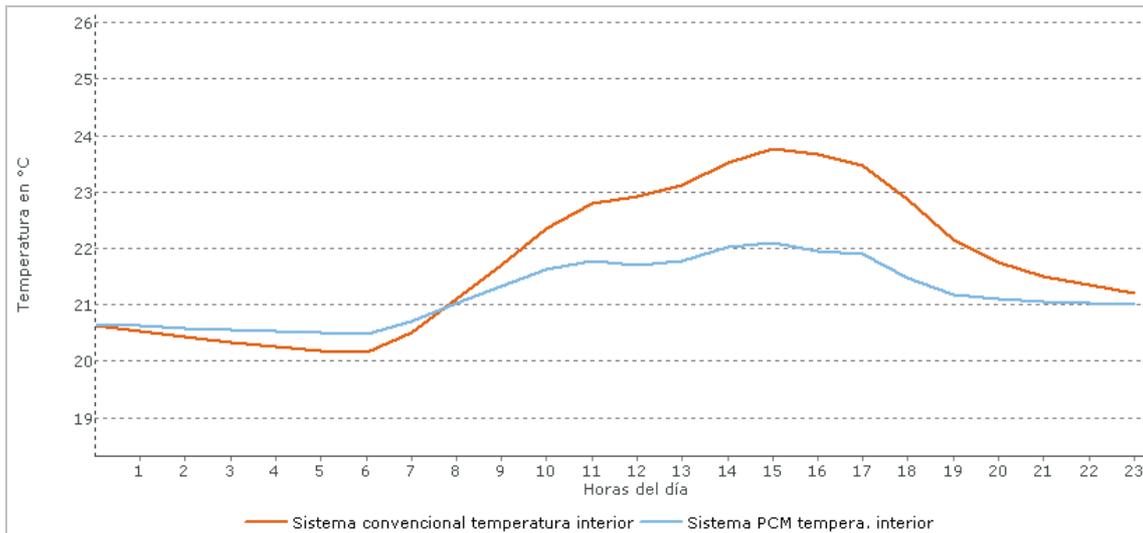
#### Valor anual acumulado de energía frigorífica

Sistema convencional  
3.192,43 kW/h

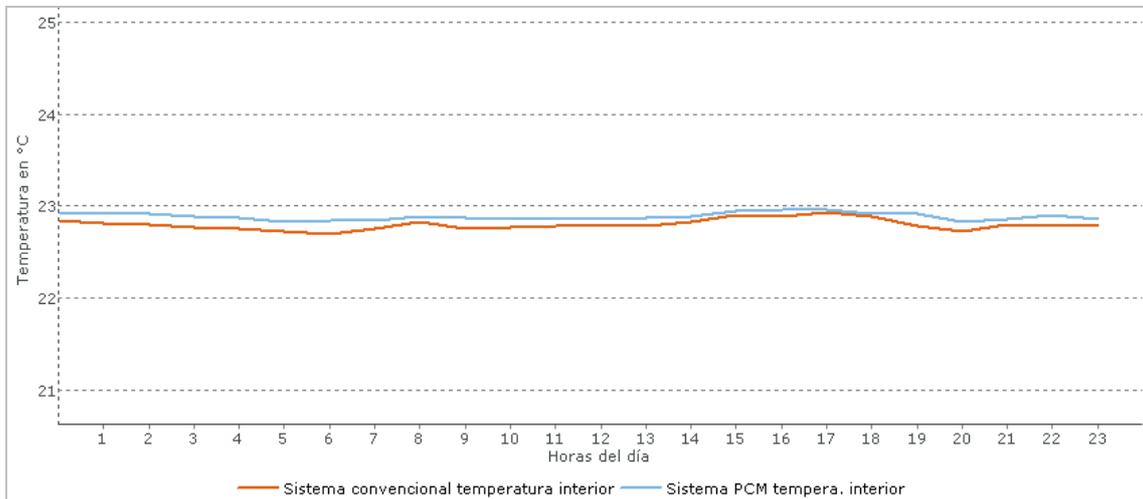
Sistema PCM  
2.915,08 kW/h (-6,9%)

Figura 11: valores de los gastos de energía con sistema convencional y sistema PCM.

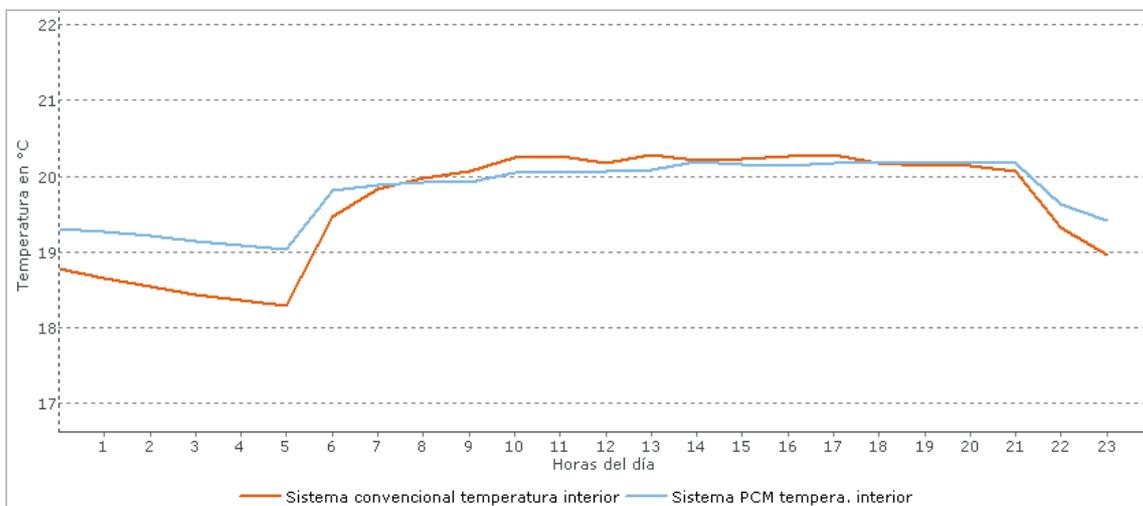
**Datos de las temperaturas en un día.**



**Figura 12:** comparativa de las temperaturas ambientales. Día 5 de marzo.



**Figura 13:** comparativa de las temperaturas ambientales. Día 15 de agosto.



**Figura 14:** comparativa de las temperaturas ambientales. Día 15 de enero.

## Smartboard 26.

### Parámetros espaciales.

---

#### **Espacio compuesto 1**

Frecuencia del compuesto: 1

#### **Espacio 1**

Longitud: 10 m  
Anchu.: 10 m  
Altu.: 2 m  
Altura de techo: 2 m  
Pared con altura de techo: 2  
Alineación pared 1: Sur  
Mobiliario: normal  
Tipo de uso: Vivienda Unifamiliar Aislada

#### **Suelo**

Construcción: Losa  
Situación montaje: en contacto con terreno

#### **Pared 1**

Construcción del sistema convencional: Pared ext. ladri. macizo  
Construcción del sistema PCM: Pared ext. ladrillo macizo Smartboard 26 pasivo  
Situación montaje: al aire exterior  
Ventana: existente  
Superficie ventana: 22,5 %  
Factor de sombreado: 0,5  
Tipo ventana: Ventana doble estándar

#### **Pared 2**

Construcción del sistema convencional: Pared ext. ladri. macizo  
Construcción del sistema PCM: Pared ext. ladrillo macizo Smartboard 26 pasivo  
Situación montaje: al aire exterior  
Ventana: existente  
Superficie ventana: 22,5 %  
Factor de sombreado: 0,5  
Tipo ventana: Ventana doble estándar

#### **Pared 3**

Construcción del sistema convencional: Pared ext. ladri. macizo  
Construcción del sistema PCM: Pared ext. ladrillo macizo Smartboard 26 pasivo  
Situación montaje: al aire exterior  
Ventana: no disponible

---

**Pared 4**

Construcción del sistema convencional:	Pared ext. ladri. macizo
Construcción del sistema PCM:	Pared ext. ladrillo macizo Smartboard 26 pasivo
Situación montaje:	al aire exterior
Ventana:	existente
Superficie ventana:	17,5 %
Factor de sombreado:	0,5
Tipo ventana:	Ventana doble estándar

**Tejado**

Construcción del sistema convencional:	Tejado inclinado
Construcción del sistema PCM:	Tejado inclinado Smartboard 26 pasivo
Situación montaje:	al aire exterior
Ventana:	no disponible

**Rentabilidad**

	<b>Sistema PCM</b>	<b>Sistema convencional</b>
<b>Inversiones</b>		
Inversión total:	8000 € (para 20 a)	7000 € (para 20 a)
<b>Costes variables</b>		
Costes calor:	0,12 €/kWh	0,12 €/kWh
Calor necesario determinado:	818,6 kWh/a	979,41 kWh/a
Costes frío:	0,12 €/kWh	0,12 €/kWh
Frío necesario determinado:	2950,43 kWh/a	3192,43 kWh/a
Otros:	0 €	0 €
Costes explotación:	0 % de las inversiones	2 % de las inversiones
<b>Carestía</b>		
Costes calor:	10 %	
Costes frío:	7 %	
Inversiones:	2 %	
Costes explotación:	4 %	
<b>Condi. marginales</b>		
Otros:	2 %	
Interés:	2 %	
Tiempo de observación:	20 a	

**Resultado de la rentabilidad**

Tiempo de amortización	5 años
Valor de capital	4206,62 euros
Réditos	29,28 %

**Tabla 3:** resultados de la rentabilidad de utilizar el sistema Smartboard 26.

## 14 ANEXO VII: Resultados obtenidos de cada simulación creada con el programa PCM EXPRESS

### Dinero acumulado (euros & años)

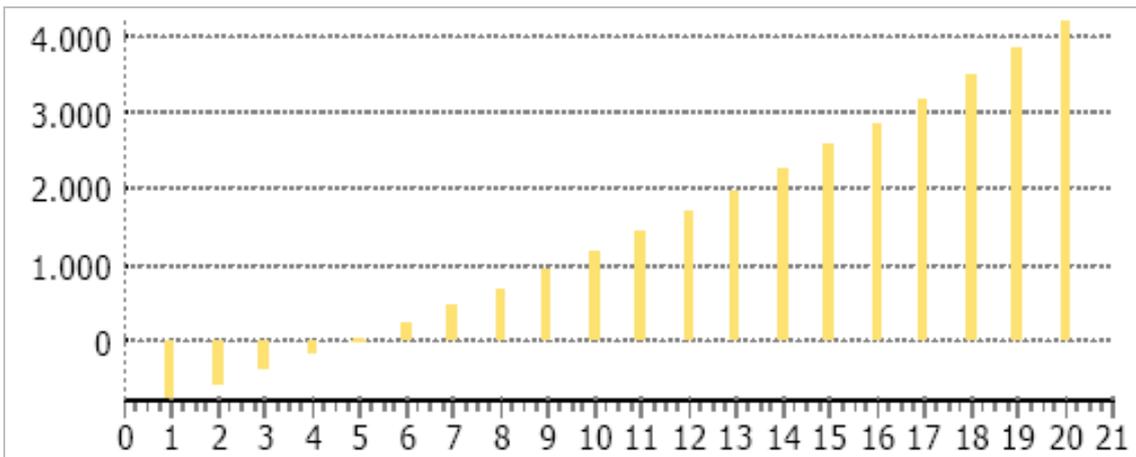


Figura 15: dinero acumulado en cada año por el uso del sistema Smartboard 26.

### Representación de la rentabilidad

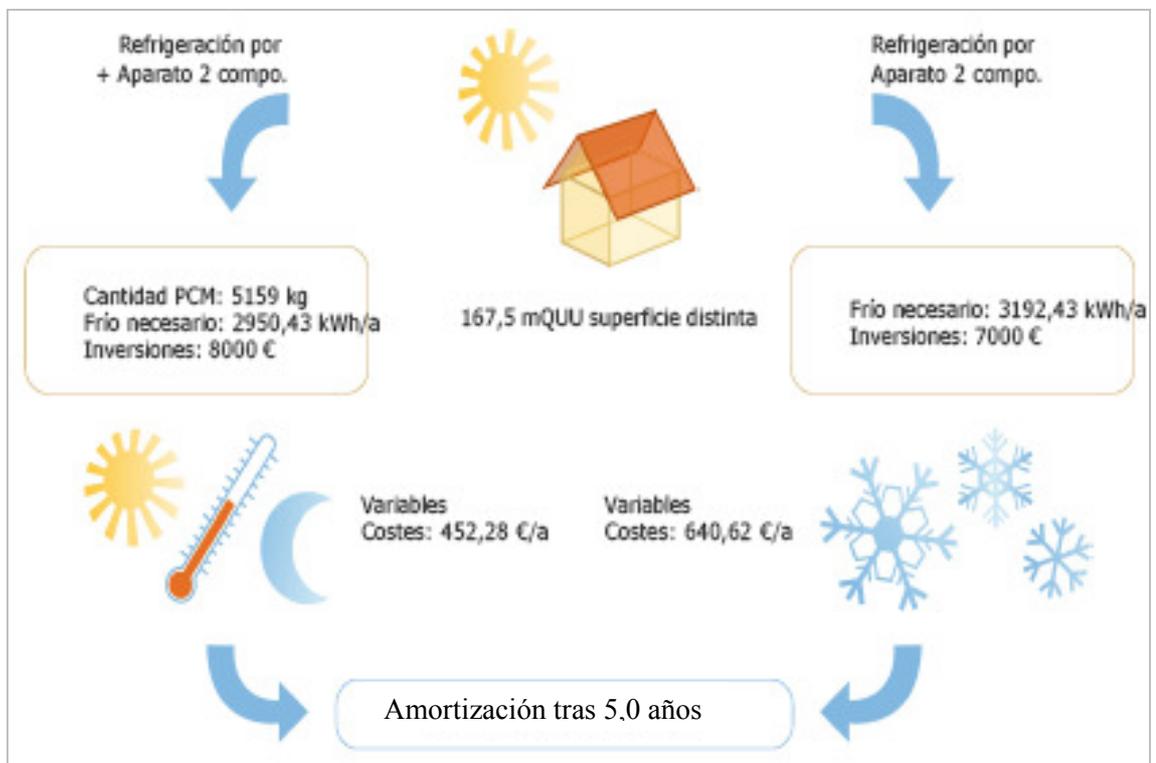
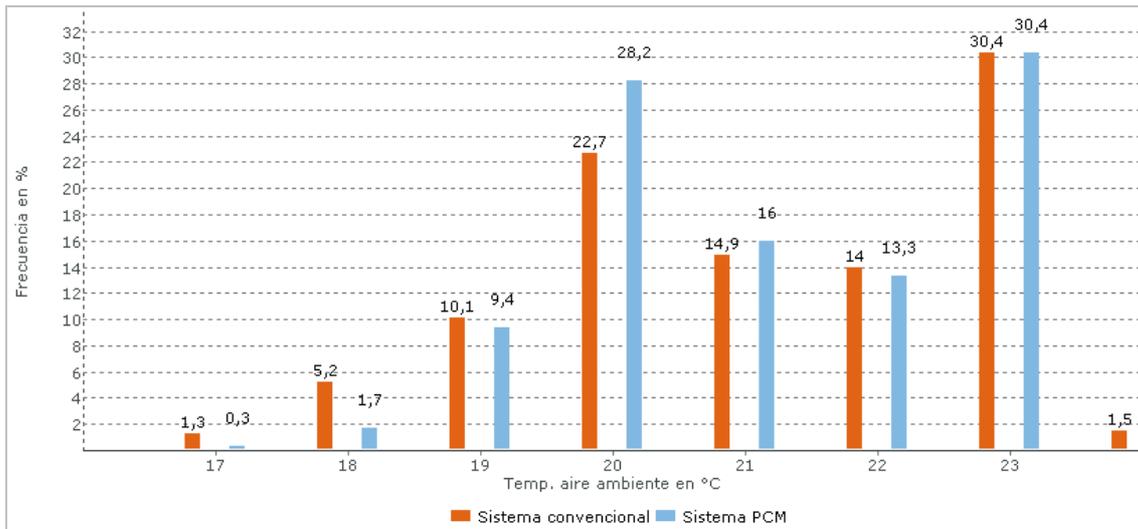


Figura 16: representación de la rentabilidad por el uso del sistema Smartboard 26.

**Datos de las temperaturas ambiente.**



**Temperaturas en el margen de confort (21-26°C)**

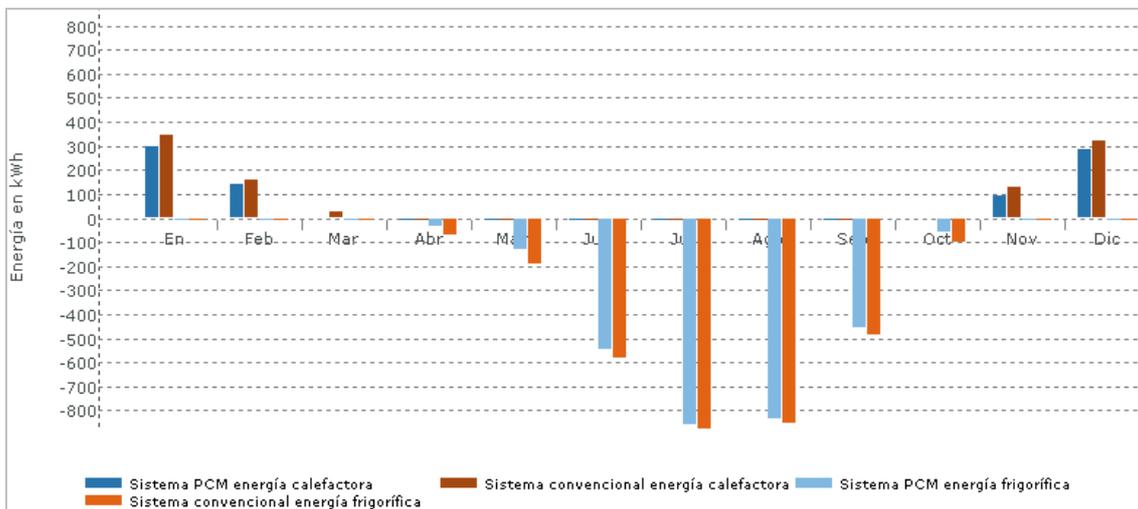
Sistema convencional	Sistema PCM
60,8% (5.326 h)	60,4% (5.291 h)

**Temperaturas superiores al margen de confort (>26°C)**

Sistema convencional	Sistema PCM
0% (0 h)	0% (0 h)

**Figura 17:** porcentaje de la frecuencia de permanencia de las temperaturas ambientales.

**Datos de los gastos de energía.**



**Valor anual acumulado de energía calorífica**

Sistema convencional	Sistema PCM
979,41 kW/h	818,60 kW/h (-16,4%)

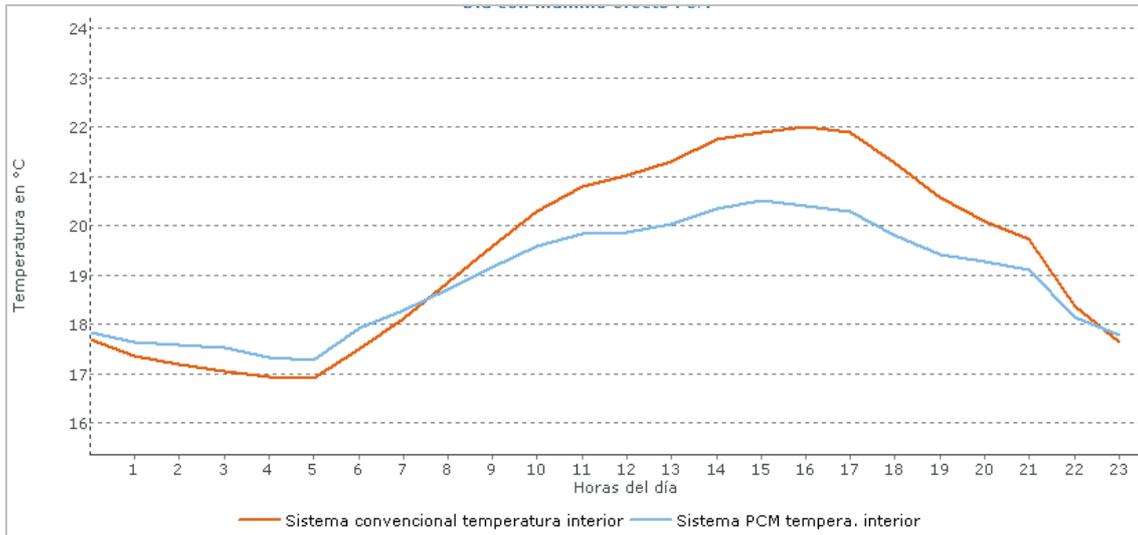
**Valor anual acumulado de energía frigorífica**

Sistema convencional	Sistema PCM
3.192,43 kW/h	2.950,43 kW/h (-7,6%)

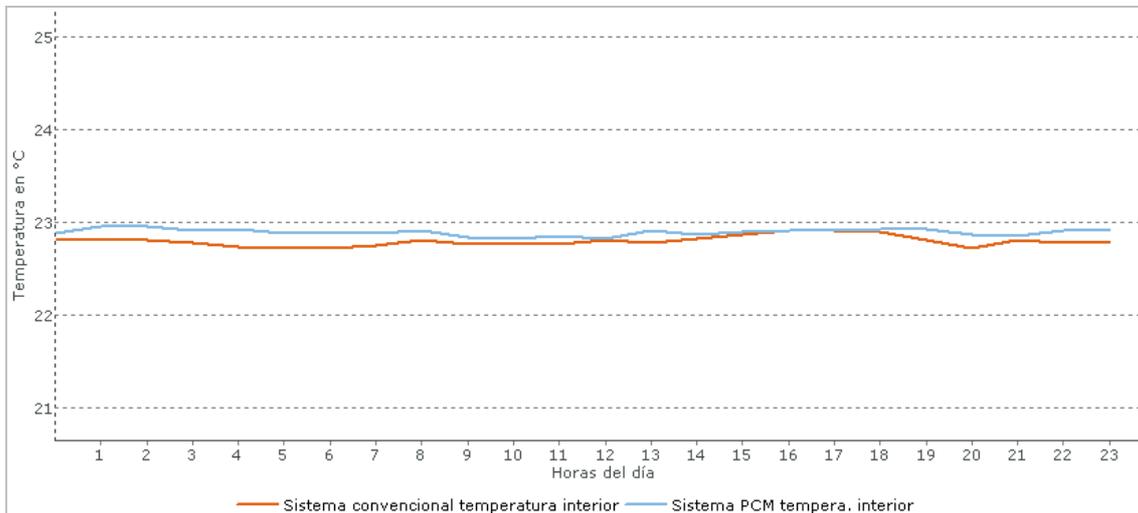
**Figura 18:** valores de los gastos de energía con sistema convencional y sistema PCM.

## 16 ANEXO VII: Resultados obtenidos de cada simulación creada con el programa PCM EXPRESS

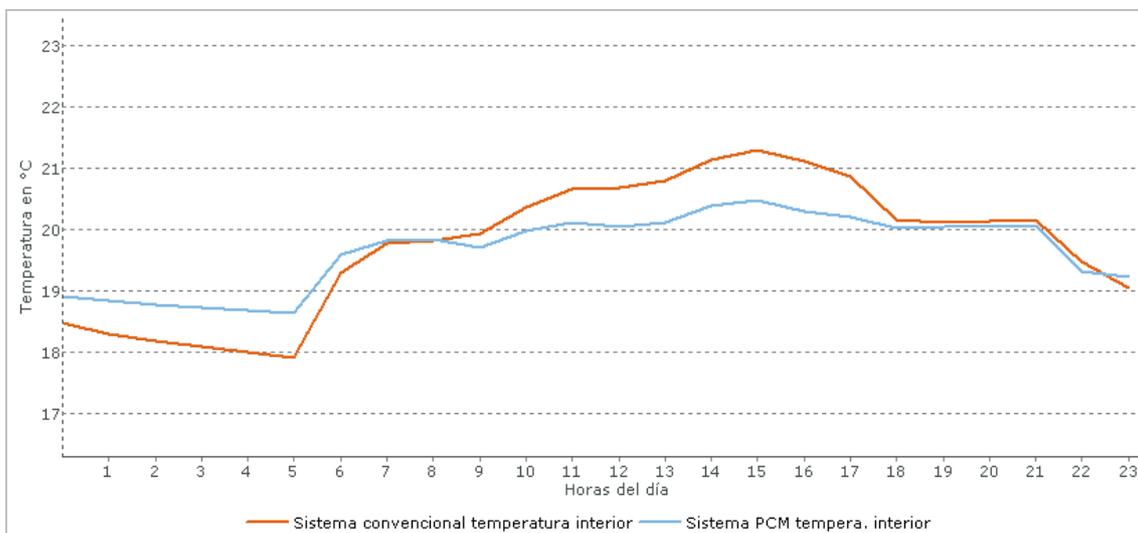
### Datos de las temperaturas en un día.



**Figura 19:** comparativa de las temperaturas ambientales. Día 26 de abril.



**Figura 20:** comparativa de las temperaturas ambientales. Día 15 de agosto.



**Figura 21:** comparativa de las temperaturas ambientales. Día 15 de enero.

## 1.2 Cara exterior.

### Smartboard 21.

#### Parámetros espaciales.

---

##### **Espacio compuesto 1**

Frecuencia del compuesto: 1

##### **Espacio 1**

Longitud: 10 m  
Anchu.: 10 m  
Alt.: 2 m  
Altura de techo: 2 m  
Pared con altura de techo: 2  
Alineación pared 1: Sur  
Mobiliario: normal  
Tipo de uso: Vivienda Unifamiliar Aislada

##### **Suelo**

Construcción: Losa  
Situación montaje: en contacto con terreno

##### **Pared 1**

Construcción del sistema convencional: Pared ext. ladri. macizo (ext)  
Construcción del sistema PCM: Pared ext. ladri. macizo Smartboard 21 activo (ext)  
Situación montaje: al aire exterior  
Ventana: existente  
Superficie ventana: 22,5 %  
Factor de sombreado: 0,5  
Tipo ventana: Ventana doble estándar

##### **Pared 2**

Construcción del sistema convencional: Pared ext. ladri. macizo (ext)  
Construcción del sistema PCM: Pared ext. ladri. macizo Smartboard 21 activo (ext)  
Situación montaje: al aire exterior  
Ventana: existente  
Superficie ventana: 22,5 %  
Factor de sombreado: 0,5  
Tipo ventana: Ventana doble estándar

##### **Pared 3**

Construcción del sistema convencional: Pared ext. ladri. macizo (ext)  
Construcción del sistema PCM: Pared ext. ladri. macizo Smartboard 21 activo (ext)  
Situación montaje: al aire exterior  
Ventana: no disponible

---

## 18 ANEXO VII: Resultados obtenidos de cada simulación creada con el programa PCM EXPRESS

### **Pared 4**

Construcción del sistema convencional:	Pared ext. ladri. macizo (ext)
Construcción del sistema PCM:	Pared ext. ladri. macizo Smartboard 21 activo (ext
Situación montaje:	al aire exterior
Ventana:	existente
Superficie ventana:	17,5 %
Factor de sombreado:	0,5
Tipo ventana:	Ventana doble estándar

### **Tejado**

Construcción del sistema convencional:	Tejado inclinado
Construcción del sistema PCM:	Tejado inclinado Smartboard 21 activo
Situación montaje:	al aire exterior
Ventana:	no disponible

## **Rentabilidad**

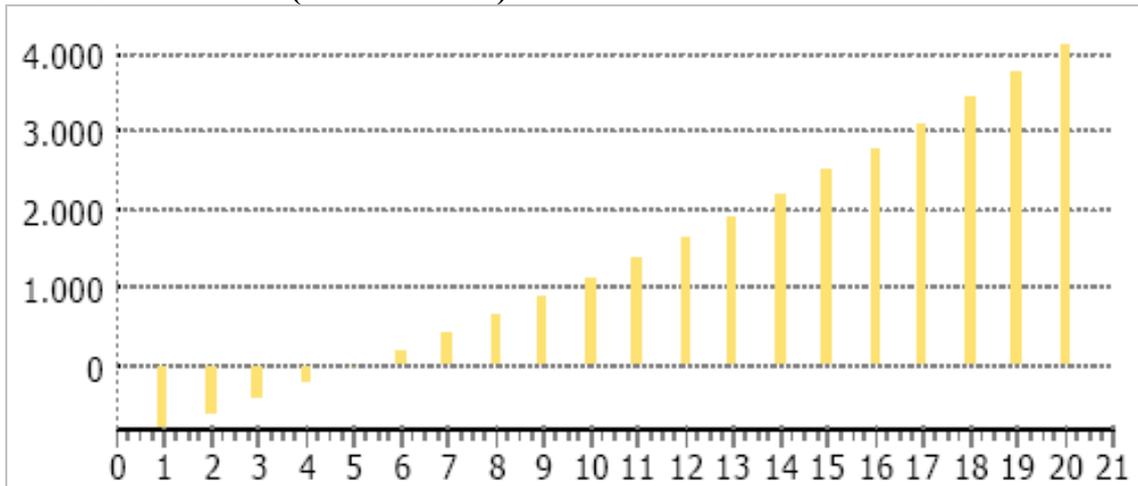
	<b>Sistema PCM</b>	<b>Sistema convencional</b>
<b>Inversiones</b>		
Inversión total:	8000 € (para 20 a)	7000 € (para 20 a)
<b>Costes variables</b>		
Costes calor:	0,12 €/kWh	0,12 €/kWh
Calor necesario determinado:	816,64 kWh/a	973,18 kWh/a
Costes frío:	0,12 €/kWh	0,12 €/kWh
Frío necesario determinado:	2996,22 kWh/a	3216,37 kWh/a
Otros:	0 €	0 €
Costes explotación:	0 % de las inversiones	2 % de las inversiones
<b>Carestía</b>		
Costes calor:	10 %	
Costes frío:	7 %	
Inversiones:	2 %	
Costes explotación:	4 %	
<b>Condi. marginales</b>		
Otros:	2 %	
Interés:	2 %	
Tiempo de observación:	20 a	

### **Resultado de la rentabilidad**

Tiempo de amortización	5,1 años
Valor de capital	4097,74 euros
Réditos	28,55 %

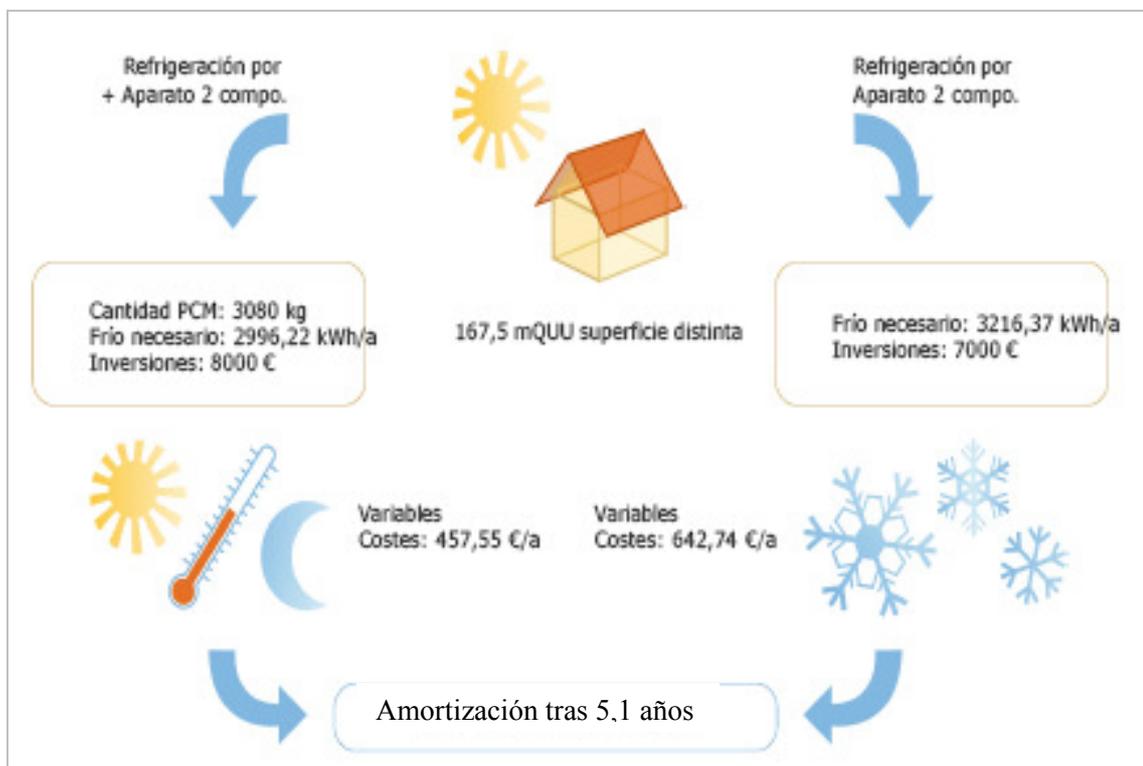
**Tabla 4:** resultados de la rentabilidad de utilizar el sistema Smartboard 21.

### Dinero acumulado (euros & años)



*Figura 22:* dinero acumulado en cada año por el uso del sistema Smartboard 21.

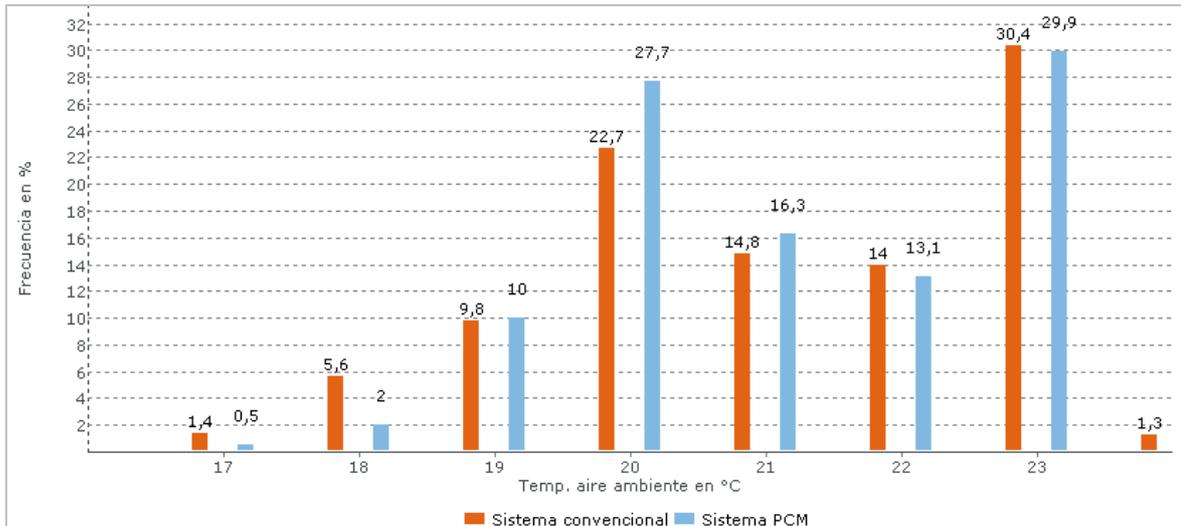
### Representación de la rentabilidad



*Figura 23:* representación de la rentabilidad por el uso del sistema Smartboard 21.

**20 ANEXO VII: Resultados obtenidos de cada simulación creada con el programa PCM EXPRESS**

**Datos de las temperaturas ambiente.**



**Temperaturas en el margen de confort (21-26°C)**

Sistema convencional  
60,5% (5.300 h)

Sistema PCM  
59,9% (5.247 h)

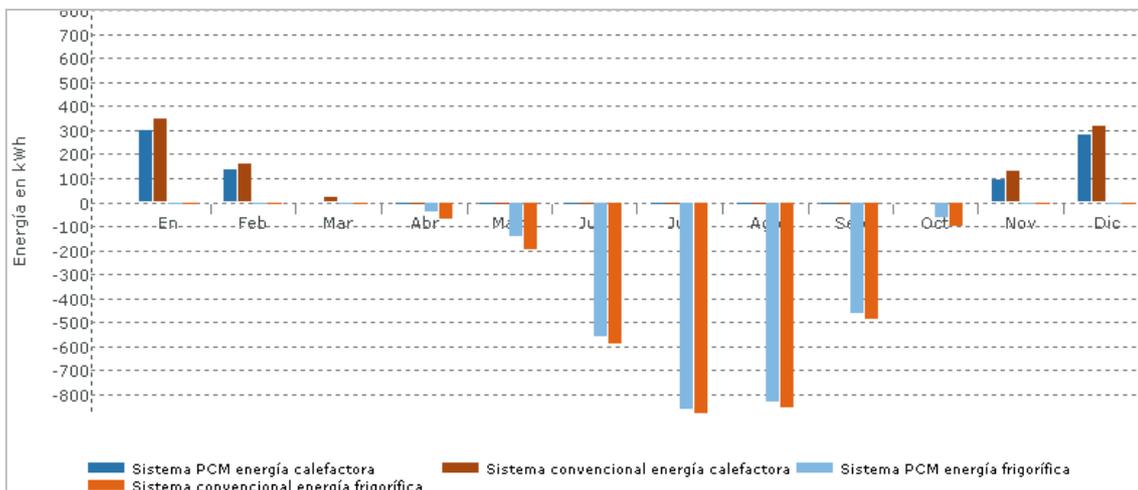
**Temperaturas superiores al margen de confort (>26°C)**

Sistema convencional  
0% (0 h)

Sistema PCM  
0% (0 h)

**Figura 24:** porcentaje de la frecuencia de permanencia de las temperaturas ambientales.

**Datos de los gastos de energía.**



**Valor anual acumulado de energía calorífica**

Sistema convencional  
973,18 kW/h

Sistema PCM  
816,64 kW/h (-16,1%)

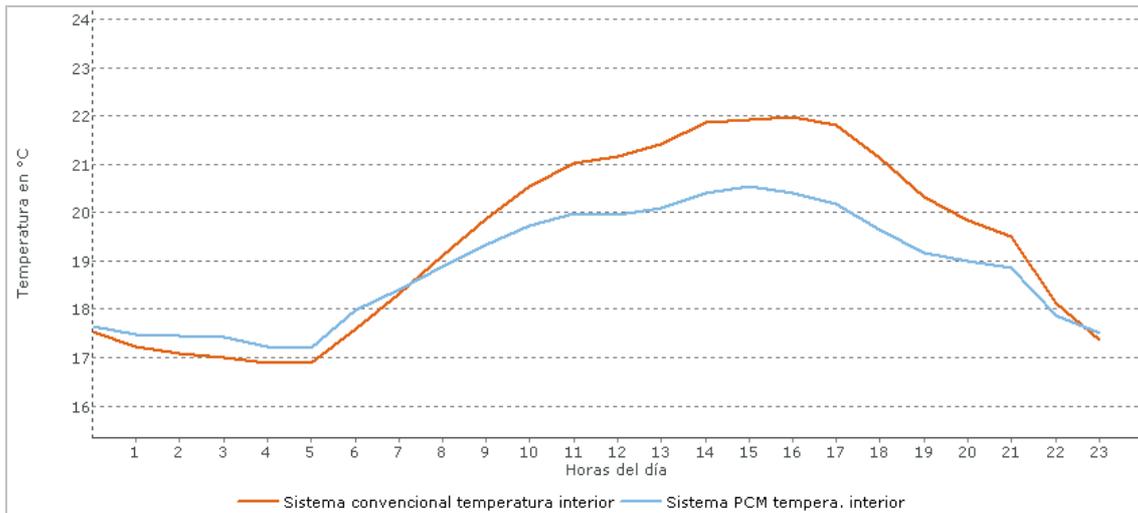
**Valor anual acumulado de energía frigorífica**

Sistema convencional  
3.216,37 kW/h

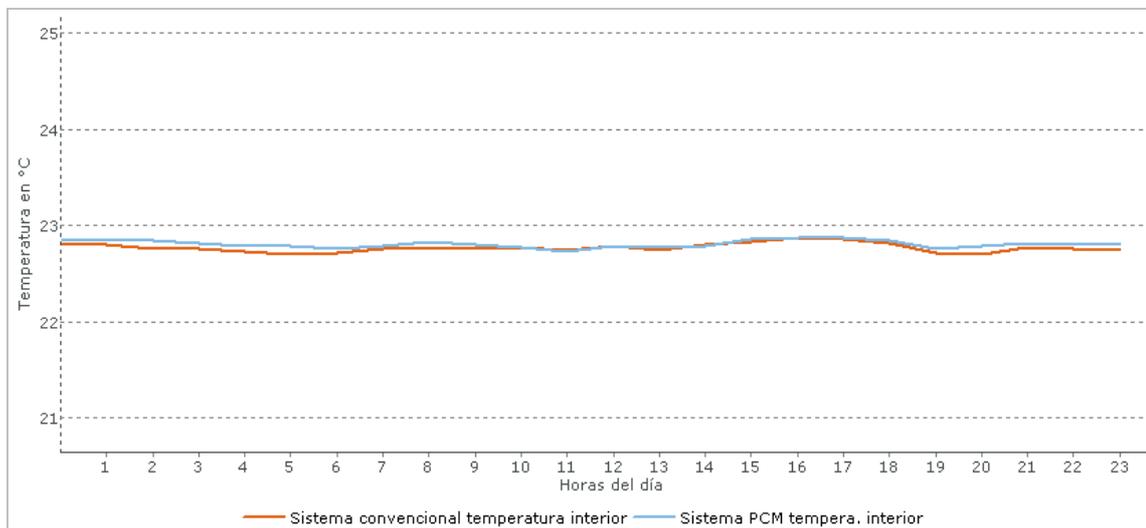
Sistema PCM  
2.996,22 kW/h (-6,8%)

**Figura 25:** valores de los gastos de energía con sistema convencional y sistema PCM.

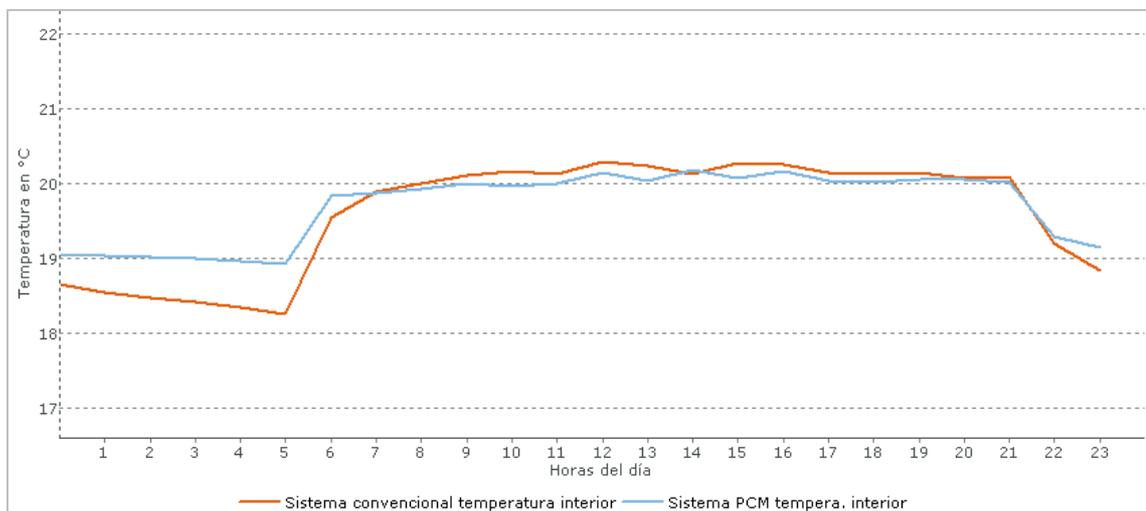
**Datos de las temperaturas en un día.**



**Figura 26:** comparativa de las temperaturas ambientales. Día 26 de abril.



**Figura 27:** comparativa de las temperaturas ambientales. Día 15 de agosto.



**Figura 28:** comparativa de las temperaturas ambientales. Día 15 de enero.

## Smartboard 23.

### Parámetros espaciales.

---

#### **Espacio compuesto 1**

Frecuencia del compuesto: 1

#### **Espacio 1**

Longitud: 10 m  
Anchu.: 10 m  
Altu.: 2 m  
Altura de techo: 2 m  
Pared con altura de techo: 2  
Alineación pared 1: Sur  
Mobiliario: normal  
Tipo de uso: Vivienda Unifamiliar Aislada

#### **Suelo**

Construcción: Losa  
Situación montaje: en contacto con terreno

#### **Pared 1**

Construcción del sistema convencional: Pared ext. ladri. macizo (ext)  
Construcción del sistema PCM: Pared ext. ladri. macizo Smartboard 23 activo (ext  
Situación montaje: al aire exterior  
Ventana: existente  
Superficie ventana: 22,5 %  
Factor de sombreado: 0,5  
Tipo ventana: Ventana doble estándar

#### **Pared 2**

Construcción del sistema convencional: Pared ext. ladri. macizo (ext)  
Construcción del sistema PCM: Pared ext. ladri. macizo Smartboard 23 activo (ext  
Situación montaje: al aire exterior  
Ventana: existente  
Superficie ventana: 22,5 %  
Factor de sombreado: 0,5  
Tipo ventana: Ventana doble estándar

#### **Pared 3**

Construcción del sistema convencional: Pared ext. ladri. macizo (ext)  
Construcción del sistema PCM: Pared ext. ladri. macizo Smartboard 23 activo (ext  
Situación montaje: al aire exterior  
Ventana: no disponible

---

**Pared 4**

Construcción del sistema convencional:	Pared ext. ladri. macizo (ext)
Construcción del sistema PCM:	Pared ext. ladri. macizo Smartboard 23 activo (ext
Situación montaje:	al aire exterior
Ventana:	existente
Superficie ventana:	17,5 %
Factor de sombreado:	0,5
Tipo ventana:	Ventana doble estándar

**Tejado**

Construcción del sistema convencional:	Tejado inclinado
Construcción del sistema PCM:	Tejado muy inclinado Smartboard 23 pasivo
Situación montaje:	al aire exterior
Ventana:	no disponible

**Rentabilidad**

	<b>Sistema PCM</b>	<b>Sistema convencional</b>
<b>Inversiones</b>		
Inversión total:	8000 € (para 20 a)	7000 € (para 20 a)
<b>Costes variables</b>		
Costes calor:	0,12 €/kWh	0,12 €/kWh
Calor necesario determinado:	815,79 kWh/a	973,18 kWh/a
Costes frío:	0,12 €/kWh	0,12 €/kWh
Frío necesario determinado:	2955,28 kWh/a	3216,37 kWh/a
Otros:	0 €	0 €
Costes explotación:	0 % de las inversiones	2 % de las inversiones
<b>Carestía</b>		
Costes calor:	10 %	
Costes frío:	7 %	
Inversiones:	2 %	
Costes explotación:	4 %	
<b>Condi. marginales</b>		
Otros:	2 %	
Interés:	2 %	
Tiempo de observación:	20 a	

**Resultado de la rentabilidad**

Tiempo de amortización	4,9 años
Valor de capital	4263,13 euros
Réditos	29,57 %

**Tabla 5:** resultados de la rentabilidad de utilizar el sistema Smartboard 23.

### Dinero acumulado (euros & años)

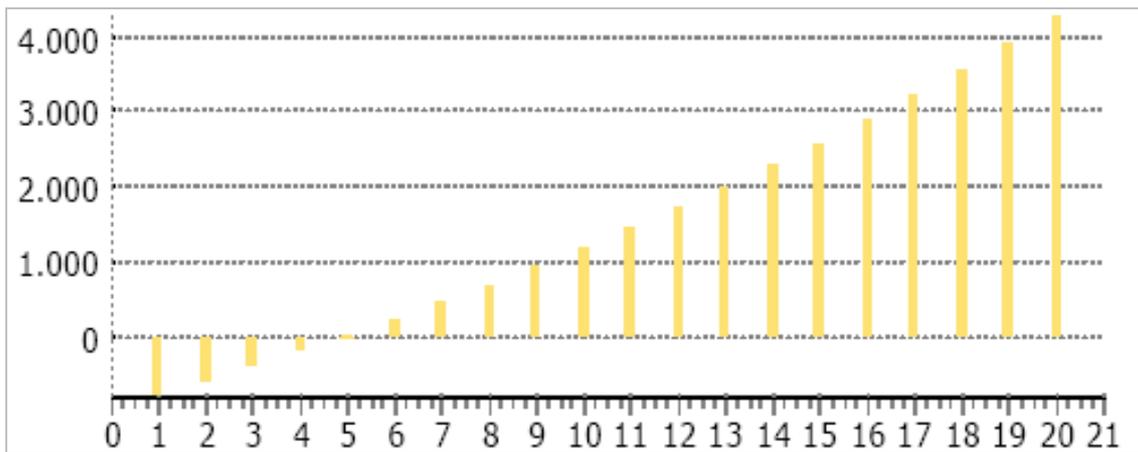


Figura 29: dinero acumulado en cada año por el uso del sistema Smartboard 23.

### Representación de la rentabilidad

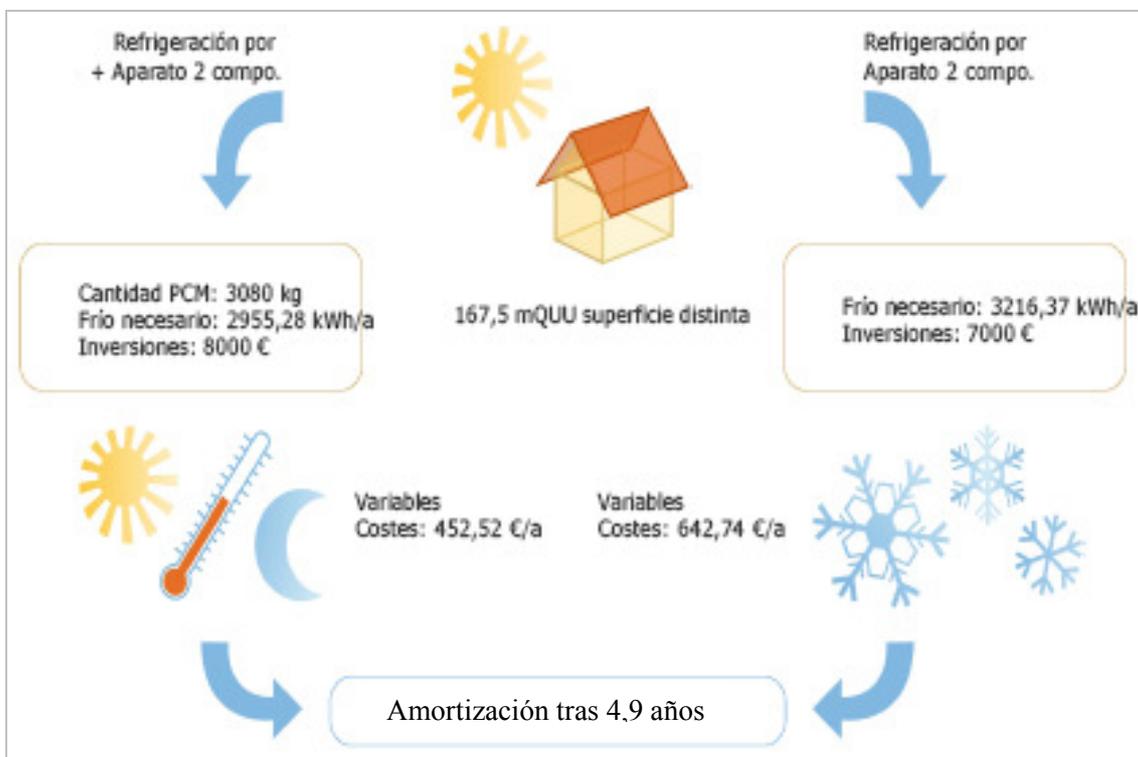
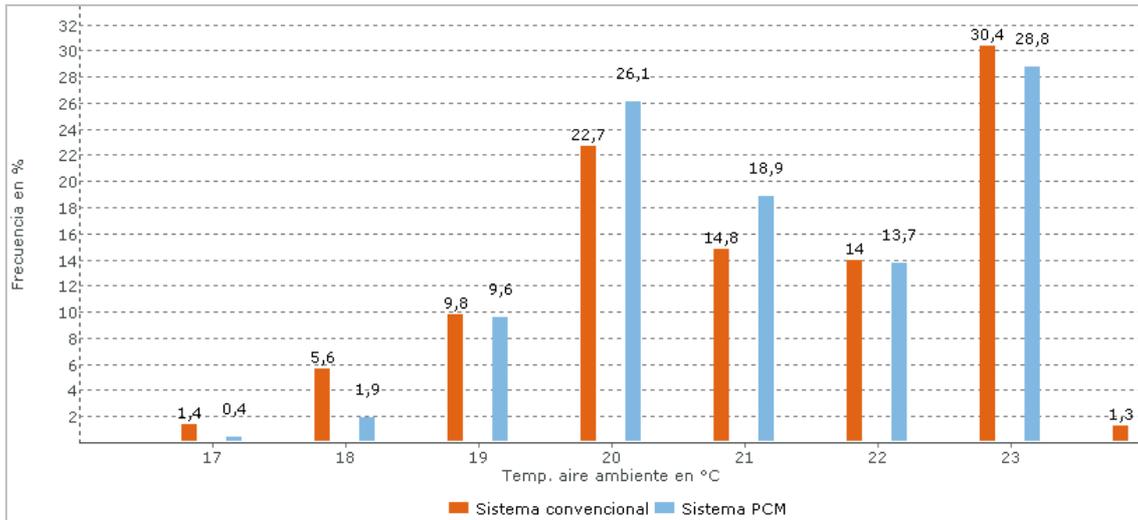


Figura 30: representación de la rentabilidad por el uso del sistema Smartboard 23.

**Datos de las temperaturas ambiente.**



**Temperaturas en el margen de confort (21-26°C)**

Sistema convencional  
60,5% (5.300 h)

Sistema PCM  
62,0% (5.431 h)

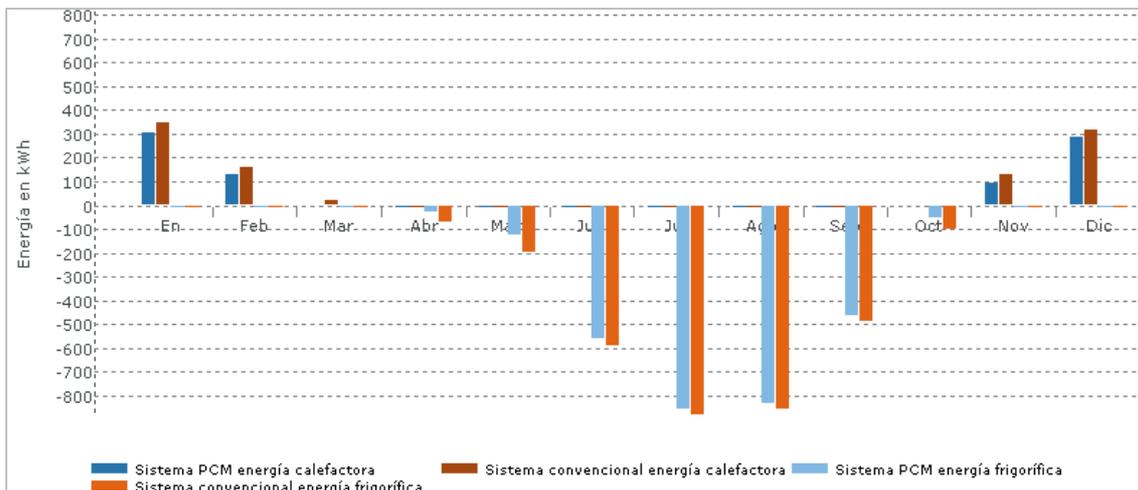
**Temperaturas superiores al margen de confort (>26°C)**

Sistema convencional  
0% (0 h)

Sistema PCM  
0% (0 h)

*Figura 31:* porcentaje de la frecuencia de permanencia de las temperaturas ambientales.

**Datos de los gastos de energía.**



**Valor anual acumulado de energía calorífica**

Sistema convencional  
973,18 kW/h

Sistema PCM  
815,79 kW/h (-16,2%)

**Valor anual acumulado de energía frigorífica**

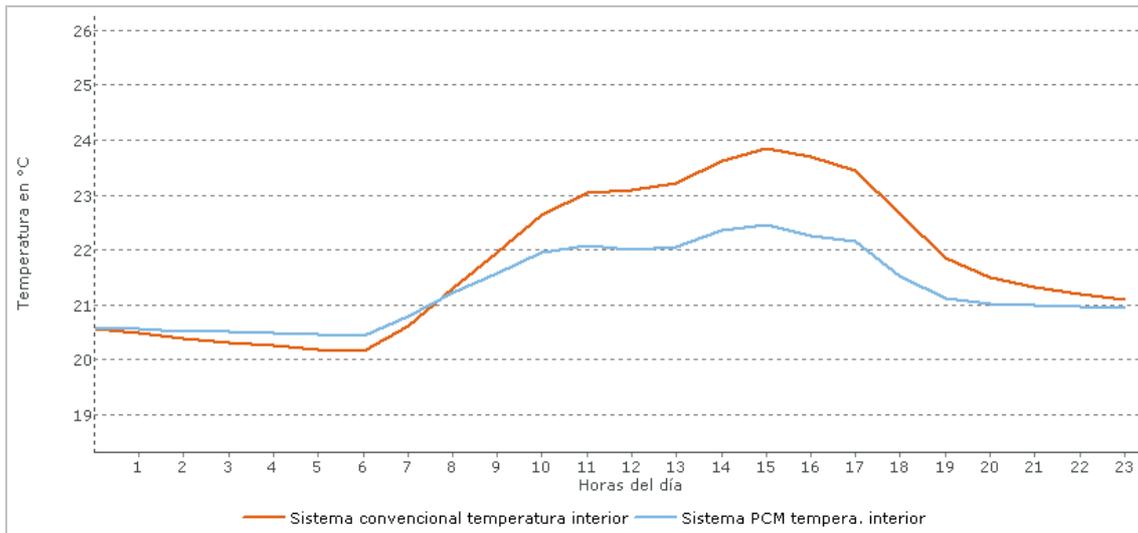
Sistema convencional  
3.216,37 kW/h

Sistema PCM  
2.955,28 kW/h (-6,9%)

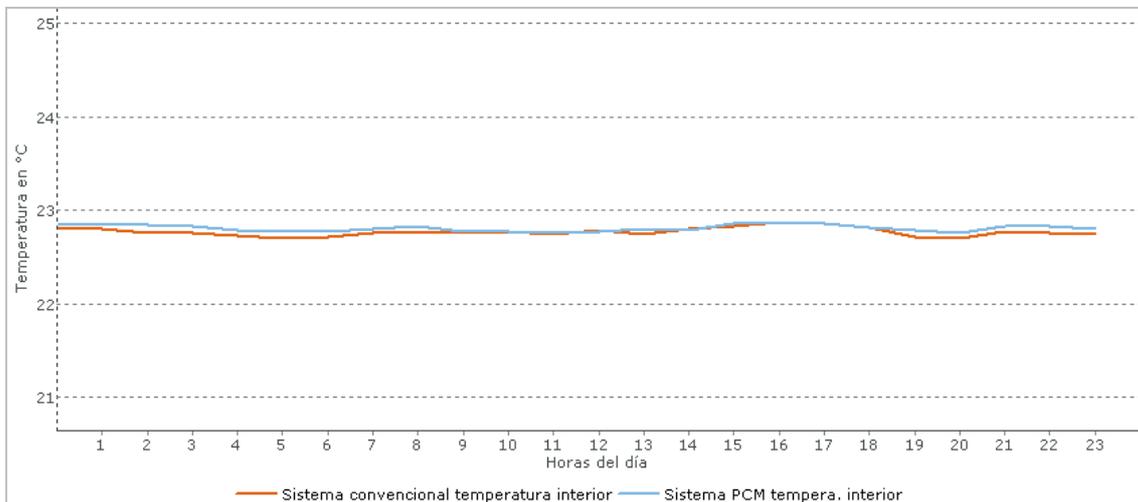
*Figura 32:* valores de los gastos de energía con sistema convencional y sistema PCM.

26 ANEXO VII: Resultados obtenidos de cada simulación creada con el programa PCM EXPRESS

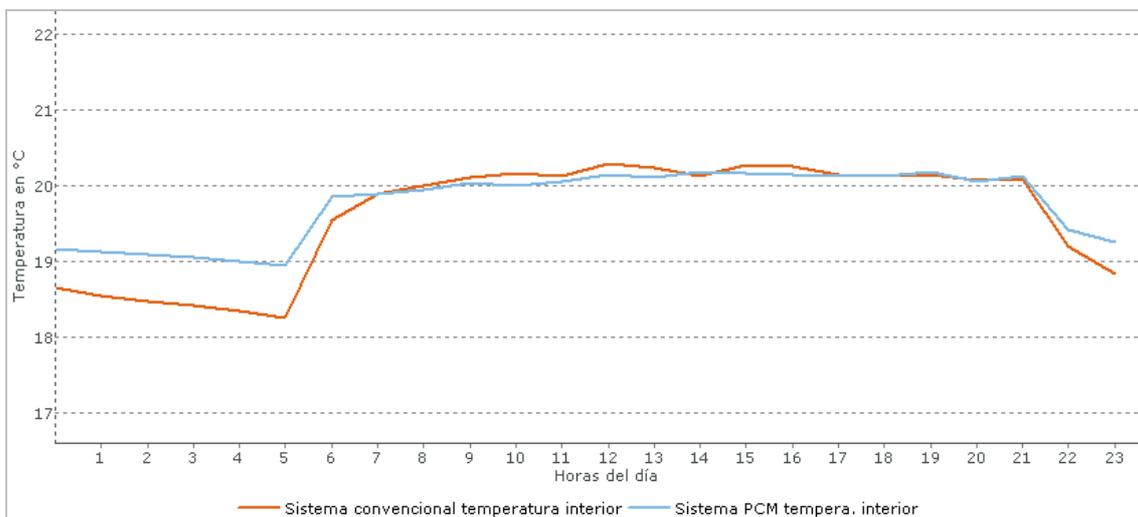
**Datos de las temperaturas en un día.**



**Figura 33:** comparativa de las temperaturas ambientales. Día 4 de marzo.



**Figura 34:** comparativa de las temperaturas ambientales. Día 15 de agosto.



**Figura 35:** comparativa de las temperaturas ambientales. Día 15 de enero.

## Smartboard 26.

### Parámetros espaciales.

---

#### **Espacio compuesto 1**

Frecuencia del compuesto: 1

#### **Espacio 1**

Longitud: 10 m  
Anchu.: 10 m  
Altu.: 2 m  
Altura de techo: 2 m  
Pared con altura de techo: 2  
Alineación pared 1: Sur  
Mobiliario: normal  
Tipo de uso: Vivienda Unifamiliar Aislada

#### **Suelo**

Construcción: Losa  
Situación montaje: en contacto con terreno

#### **Pared 1**

Construcción del sistema convencional: Pared ext. ladri. macizo (ext)  
Construcción del sistema PCM: Pared ext. ladri. macizo Smartboard 26 activo (ext  
Situación montaje: al aire exterior  
Ventana: existente  
Superficie ventana: 22,5 %  
Factor de sombreado: 0,5  
Tipo ventana: Ventana doble estándar

#### **Pared 2**

Construcción del sistema convencional: Pared ext. ladri. macizo (ext)  
Construcción del sistema PCM: Pared ext. ladri. macizo Smartboard 26 activo (ext  
Situación montaje: al aire exterior  
Ventana: existente  
Superficie ventana: 22,5 %  
Factor de sombreado: 0,5  
Tipo ventana: Ventana doble estándar

#### **Pared 3**

Construcción del sistema convencional: Pared ext. ladri. macizo (ext)  
Construcción del sistema PCM: Pared ext. ladri. macizo Smartboard 26 activo (ext  
Situación montaje: al aire exterior  
Ventana: no disponible

---

**28 ANEXO VII: Resultados obtenidos de cada simulación creada con el programa PCM EXPRESS**

**Pared 4**

Construcción del sistema convencional:	Pared ext. ladri. macizo (ext)
Construcción del sistema PCM:	Pared ext. ladri. macizo Smartboard 26 activo (ext
Situación montaje:	al aire exterior
Ventana:	existente
Superficie ventana:	17,5 %
Factor de sombreado:	0,5
Tipo ventana:	Ventana doble estándar

**Tejado**

Construcción del sistema convencional:	Tejado inclinado
Construcción del sistema PCM:	Tejado inclinado Smartboard 26 pasivo
Situación montaje:	al aire exterior
Ventana:	no disponible

**Rentabilidad**

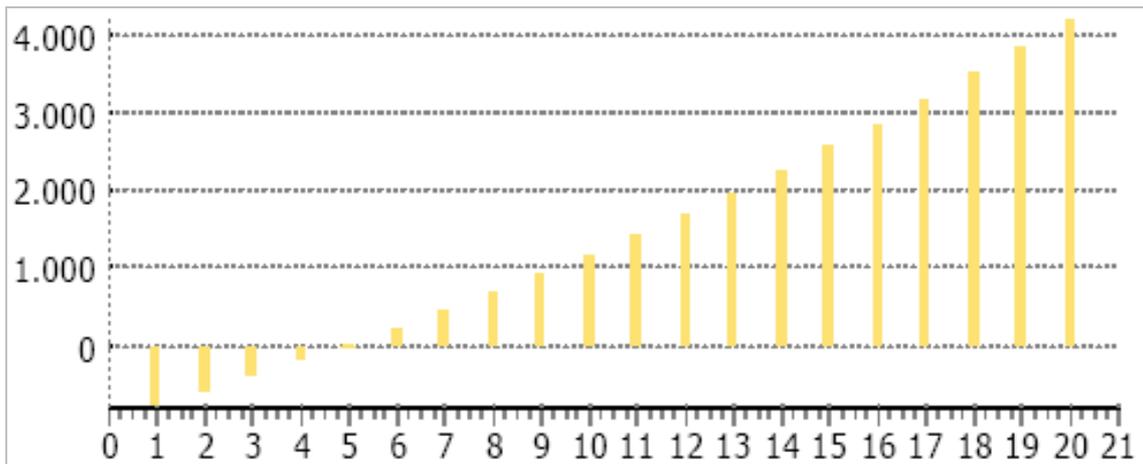
	<b>Sistema PCM</b>	<b>Sistema convencional</b>
<b>Inversiones</b>		
Inversión total:	8000 € (para 20 a)	7000 € (para 20 a)
<b>Costes variables</b>		
Costes calor:	0,12 €/kWh	0,12 €/kWh
Calor necesario determinado:	823,23 kWh/a	973,18 kWh/a
Costes frío:	0,12 €/kWh	0,12 €/kWh
Frío necesario determinado:	2964,2 kWh/a	3216,37 kWh/a
Otros:	0 €	0 €
Costes explotación:	0 % de las inversiones	2 % de las inversiones
<b>Carestía</b>		
Costes calor:	10 %	
Costes frío:	7 %	
Inversiones:	2 %	
Costes explotación:	4 %	
<b>Condi. marginales</b>		
Otros:	2 %	
Interés:	2 %	
Tiempo de observación:	20 a	

**Resultado de la rentabilidad**

Tiempo de amortización	5 años
Valor de capital	4187,94 euros
Réditos	28,98 %

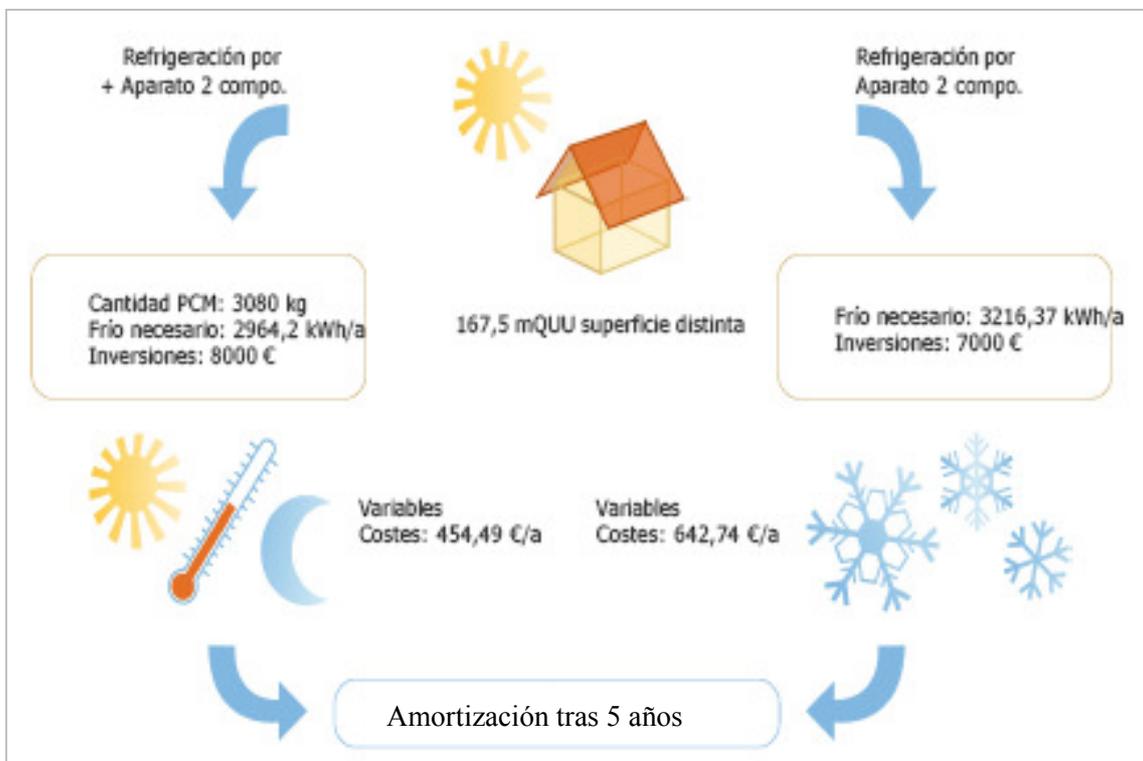
**Tabla 5:** resultados de la rentabilidad de utilizar el sistema Smartboard 26.

### Dinero acumulado (euros & años)



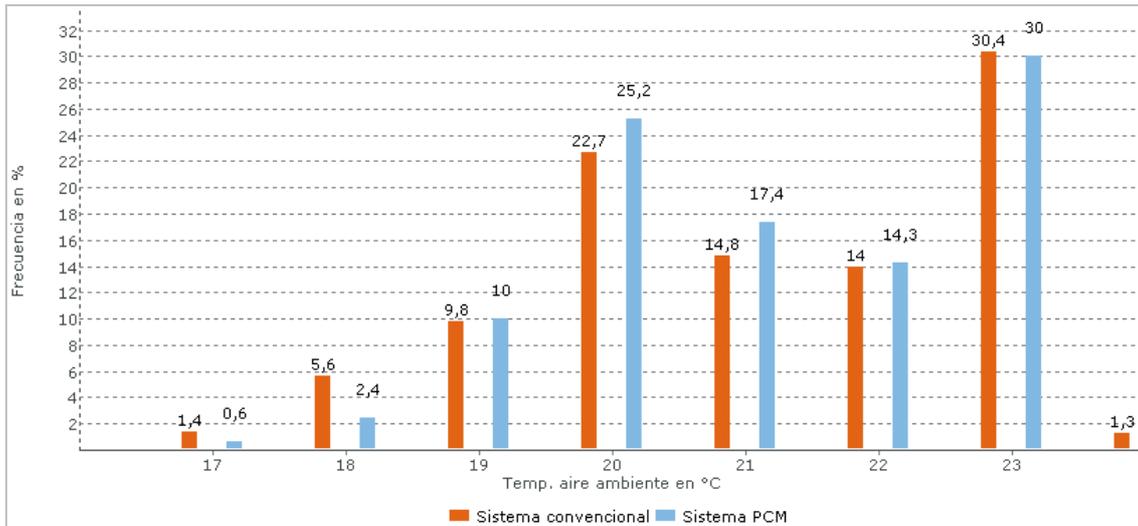
*Figura 36:* dinero acumulado en cada año por el uso del sistema Smartboard 26.

### Representación de la rentabilidad



*Figura 37:* representación de la rentabilidad por el uso del sistema Smartboard 26.

**Datos de las temperaturas ambiente.**



**Temperaturas en el margen de confort (21-26°C)**

Sistema convencional  
60,5% (5.300 h)

Sistema PCM  
61,8% (5.414 h)

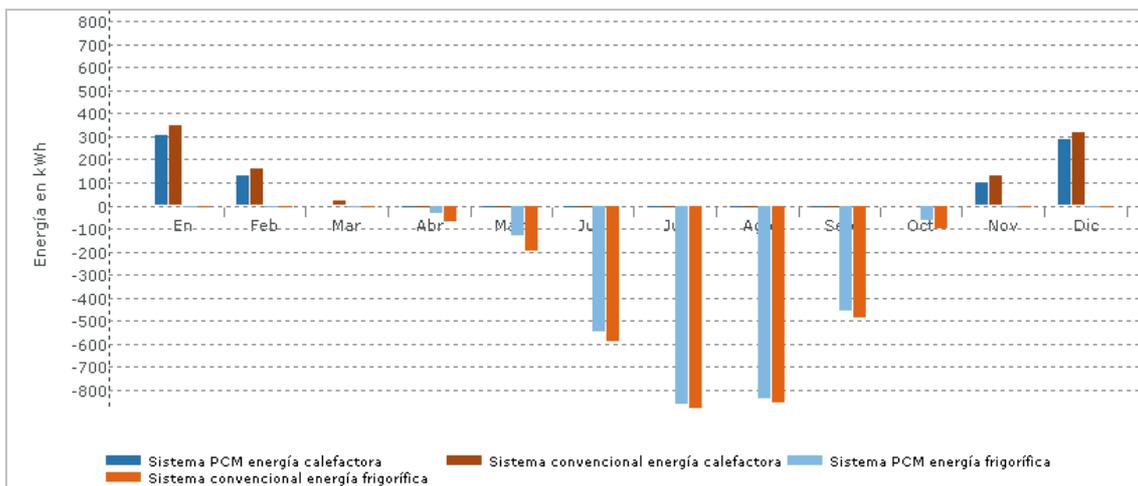
**Temperaturas superiores al margen de confort (>26°C)**

Sistema convencional  
0% (0 h)

Sistema PCM  
0% (0 h)

**Figura 38:** porcentaje de la frecuencia de permanencia de las temperaturas ambientales.

**Datos de los gastos de energía.**



**Valor anual acumulado de energía calorífica**

Sistema convencional  
973,18 kW/h

Sistema PCM  
823,23 kW/h (-15,4%)

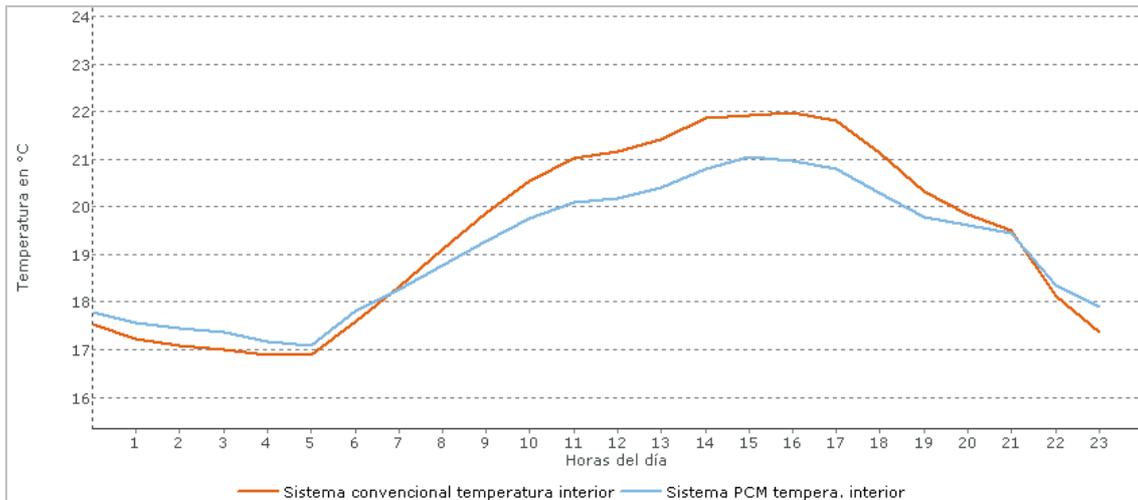
**Valor anual acumulado de energía frigorífica**

Sistema convencional  
3.216,37 kW/h

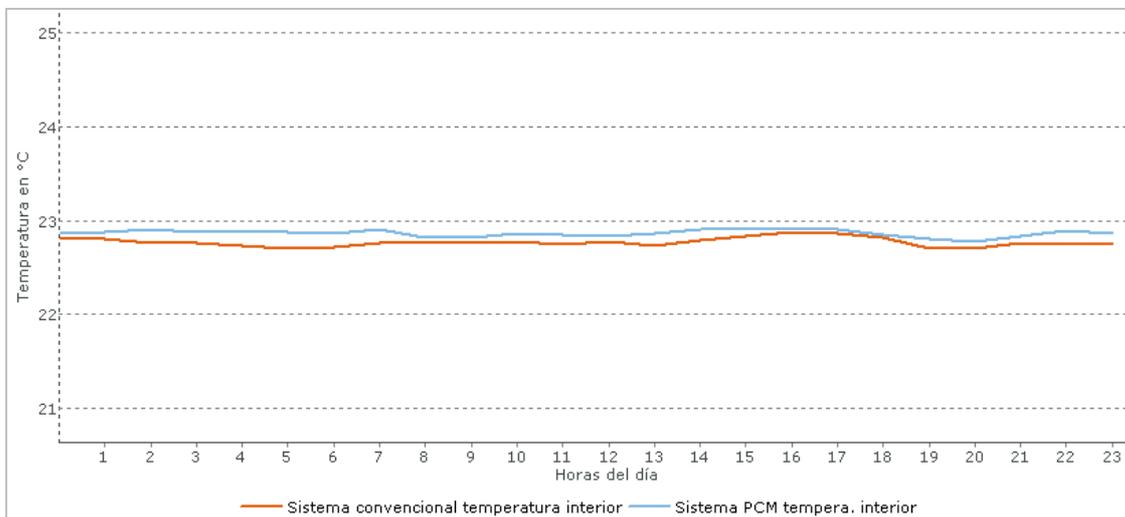
Sistema PCM  
2.964,20 kW/h (-7,8%)

**Figura 39:** valores de los gastos de energía con sistema convencional y sistema PCM.

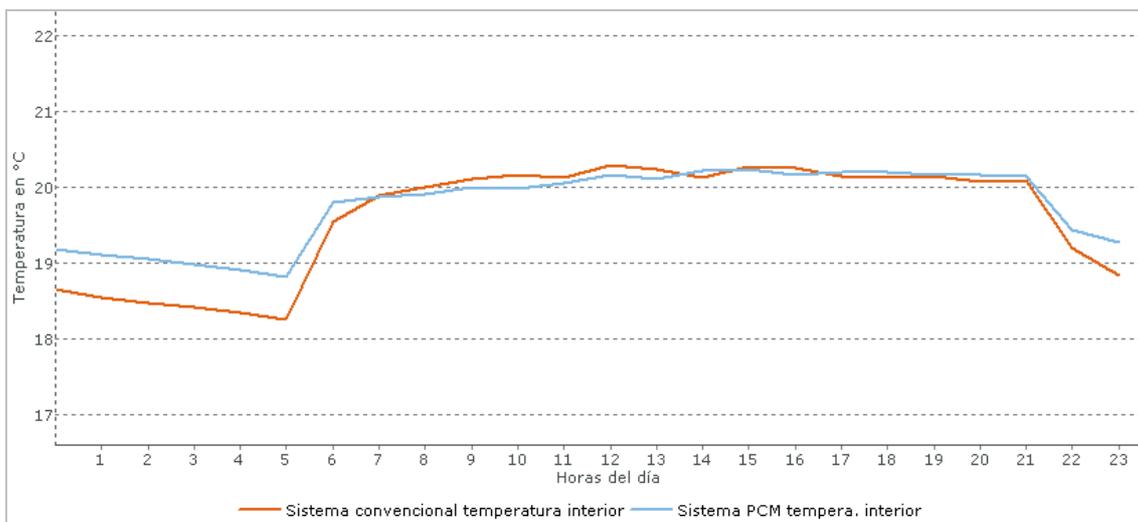
**Datos de las temperaturas en un día.**



**Figura 40:** comparativa de las temperaturas ambientales. Día 26 de abril.



**Figura 41:** comparativa de las temperaturas ambientales. Día 15 de agosto.



**Figura 42:** comparativa de las temperaturas ambientales. Día 15 de enero.

## 2. SORIA

### **Datos proyecto**

Lugar del objeto	Soria
Datos climáticos (base de la simulación)	Soria
Los resultados se basan en una comparación entre un sistema PCM y un sistema convencional (sin PCM).	

### **. Técnica doméstica**

	<b>Sistema PCM</b>	<b>Sistema convencional</b>
<b>Ventilación</b>		
Ventilación natural con ventanas	existente	existente
Ventilación mecánica	existente	existente
Ventilación noche de verano	existente	existente
Recuperación de calor	existente	existente
Transmisor geotérmico	No disponible	No disponible
<b>Técnica calefactora</b>		
Descenso nocturno	existente	existente
Temperatura funcionamiento	21°C	21°C
Periodo calefactora	1/09- 31/5	1/09- 31/5
Potencia de radiadores	80 W/m2	80 W/m2
Calefactora superficies	No disponible	No disponible
Registro calefac. en sistema ventilación	existente	existente
<b>Técnica refrigeración</b>		
Técnica refrigeración	existente	existente
Temperatura funcionamiento	26°C	26°C
Dato ref. a temperatura nominal	absoluto	absoluto
Fuente de frío	Aparato 2 compo.	Aparato 2 compo.
Potencia frigorífica máxima	100 W/m2	100 W/m2

## 2.1 Cara interior.

### Smartboard 21.

#### Parámetros espaciales.

---

##### **Espacio compuesto 1**

Frecuencia del compuesto: 1

##### **Espacio 1**

Longitud: 10 m  
Anchu.: 10 m  
Altu.: 2 m  
Altura de techo: 2 m  
Pared con altura de techo: 2  
Alineación pared 1: Sur  
Mobiliario: normal  
Tipo de uso: Vivienda Unifamiliar Aislada

##### **Suelo**

Construcción: Losa  
Situación montaje: en contacto con terreno

##### **Pared 1**

Construcción del sistema convencional: Pared ext. ladri. macizo  
Construcción del sistema PCM: Pared ext. ladri. macizo Smartboard 21 activo  
Situación montaje: al aire exterior  
Ventana: existente  
Superficie ventana: 22,5 %  
Factor de sombreado: 0,5  
Tipo ventana: Ventana doble estándar

##### **Pared 2**

Construcción del sistema convencional: Pared ext. ladri. macizo  
Construcción del sistema PCM: Pared ext. ladri. macizo Smartboard 21 activo  
Situación montaje: al aire exterior  
Ventana: existente  
Superficie ventana: 22,5 %  
Factor de sombreado: 0,5  
Tipo ventana: Ventana doble estándar

##### **Pared 3**

Construcción del sistema convencional: Pared ext. ladri. macizo  
Construcción del sistema PCM: Pared ext. ladri. macizo Smartboard 21 activo  
Situación montaje: al aire exterior  
Ventana: no disponible

---

34 ANEXO VII: Resultados obtenidos de cada simulación creada con el programa PCM EXPRESS

**Pared 4**

Construcción del sistema convencional:	Pared ext. ladri. macizo
Construcción del sistema PCM:	Pared ext. ladri. macizo Smartboard 21 activo
Situación montaje:	al aire exterior
Ventana:	existente
Superficie ventana:	17,5 %
Factor de sombreado:	0,5
Tipo ventana:	Ventana doble estándar

**Tejado**

Construcción del sistema convencional:	Tejado inclinado
Construcción del sistema PCM:	Tejado inclinado Smartboard 21 activo
Situación montaje:	al aire exterior
Ventana:	no disponible

**Rentabilidad**

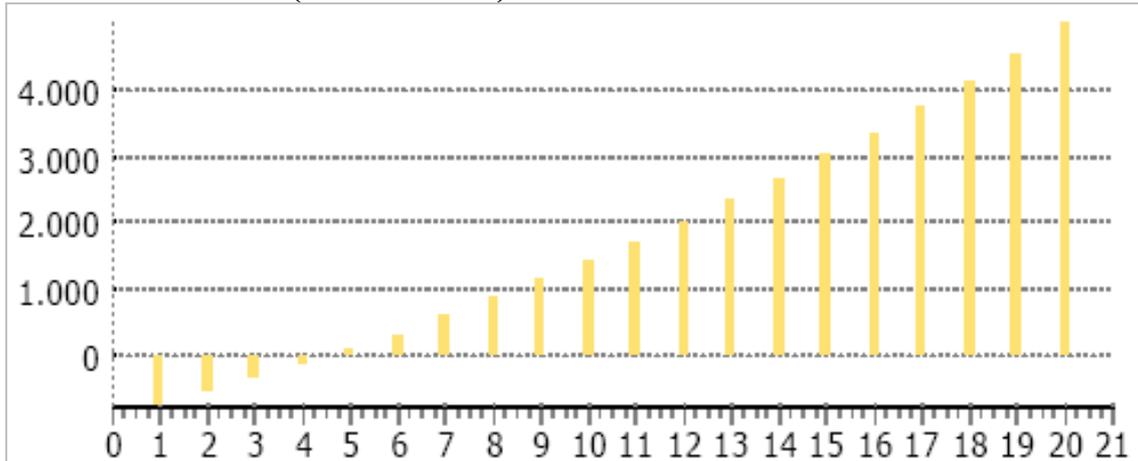
	<b>Sistema PCM</b>	<b>Sistema convencional</b>
<b>Inversiones</b>		
Inversión total:	8000 € (para 20 a)	7000 € (para 20 a)
<b>Costes variables</b>		
Costes calor:	0,12 €/kWh	0,12 €/kWh
Calor necesario determinado:	3605,12 kWh/a	3999,32 kWh/a
Costes frío:	0,12 €/kWh	0,12 €/kWh
Frío necesario determinado:	315,83 kWh/a	444,75 kWh/a
Otros:	0 €	0 €
Costes explotación:	0 % de las inversiones	2 % de las inversiones
<b>Carestía</b>		
Costes calor:	10 %	
Costes frío:	7 %	
Inversiones:	2 %	
Costes explotación:	4 %	
<b>Condi. marginales</b>		
Otros:	2 %	
Interés:	2 %	
Tiempo de observación:	20 a	

**Resultado de la rentabilidad**

Tiempo de amortización	4,6 años
Valor de capital	5022,18 euros
Réditos	32,53 %

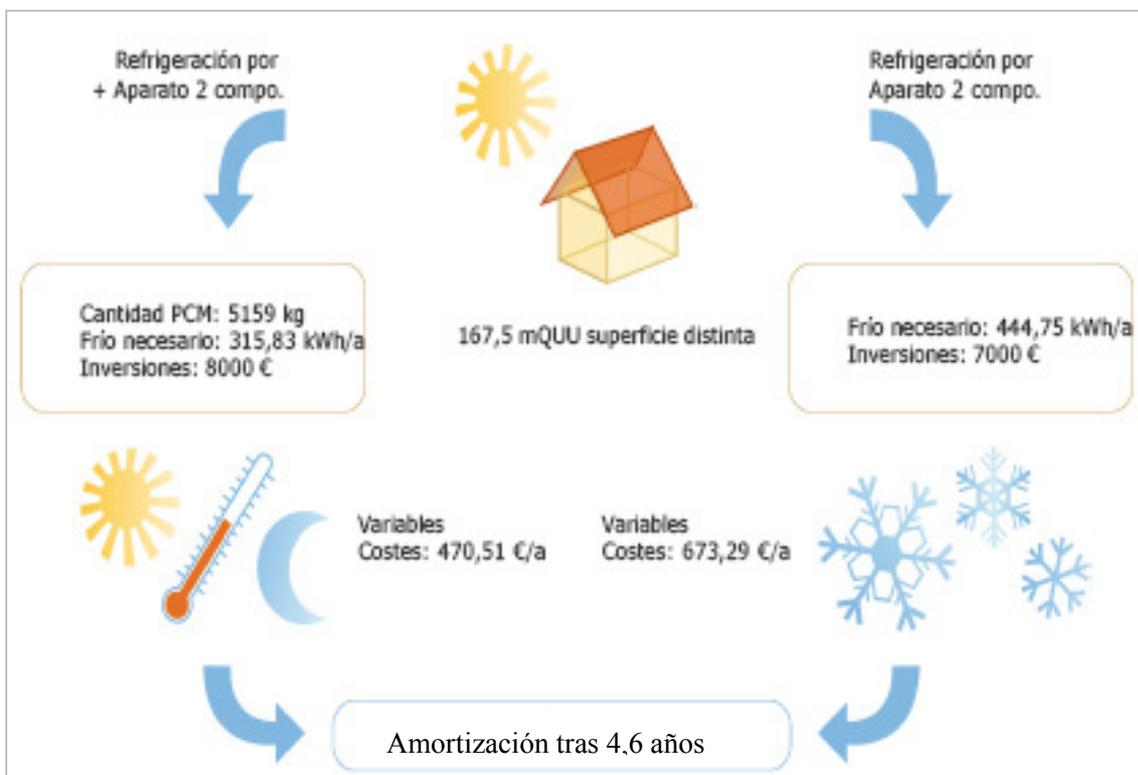
**Tabla 7:** resultados de la rentabilidad de utilizar el sistema Smartboard 21.

### Dinero acumulado (euros & años)



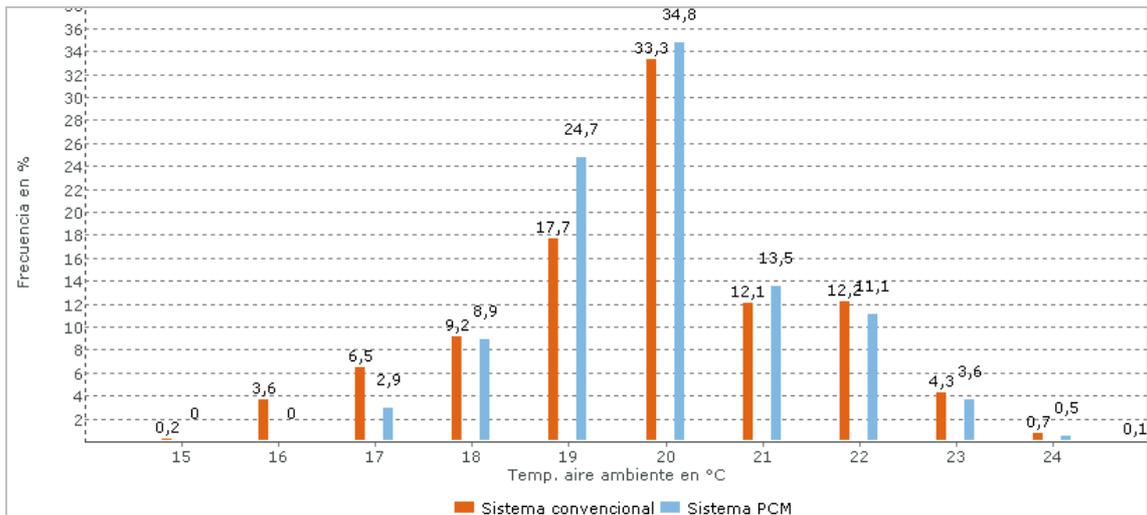
*Figura 43:* dinero acumulado en cada año por el uso del sistema Smartboard 21.

### Representación de la rentabilidad



*Figura 44:* representación de la rentabilidad por el uso del sistema Smartboard 21.

**Datos de las temperaturas ambiente.**



**Temperaturas en el margen de confort (21-26°C)**

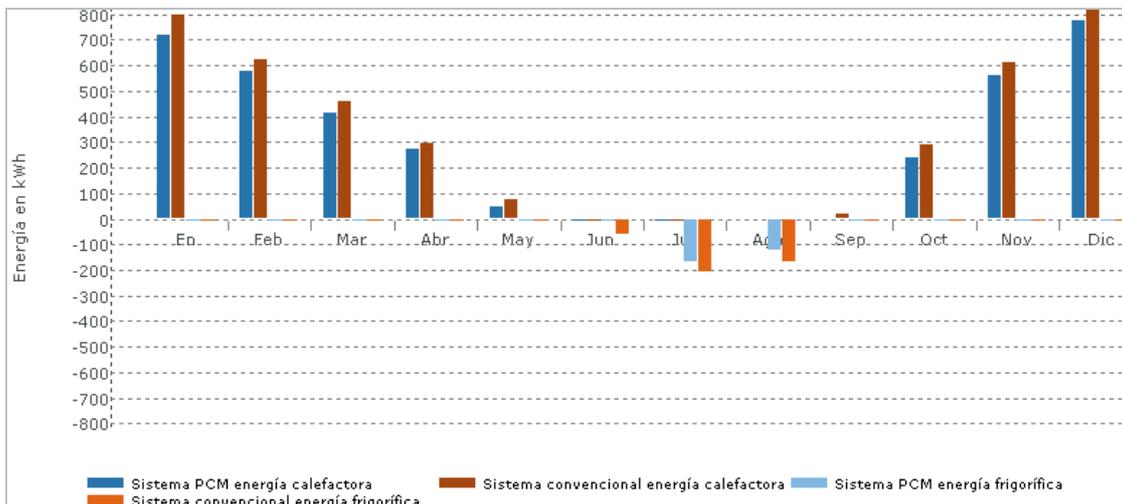
Sistema convencional	Sistema PCM
29,4% (2.575 h)	28,7% (2.514 h)

**Temperaturas superiores al margen de confort (>26°C)**

Sistema convencional	Sistema PCM
0% (0 h)	0% (0 h)

**Figura 45:** porcentaje de la frecuencia de permanencia de las temperaturas ambientales.

**Datos de los gastos de energía.**



**Valor anual acumulado de energía calorífica**

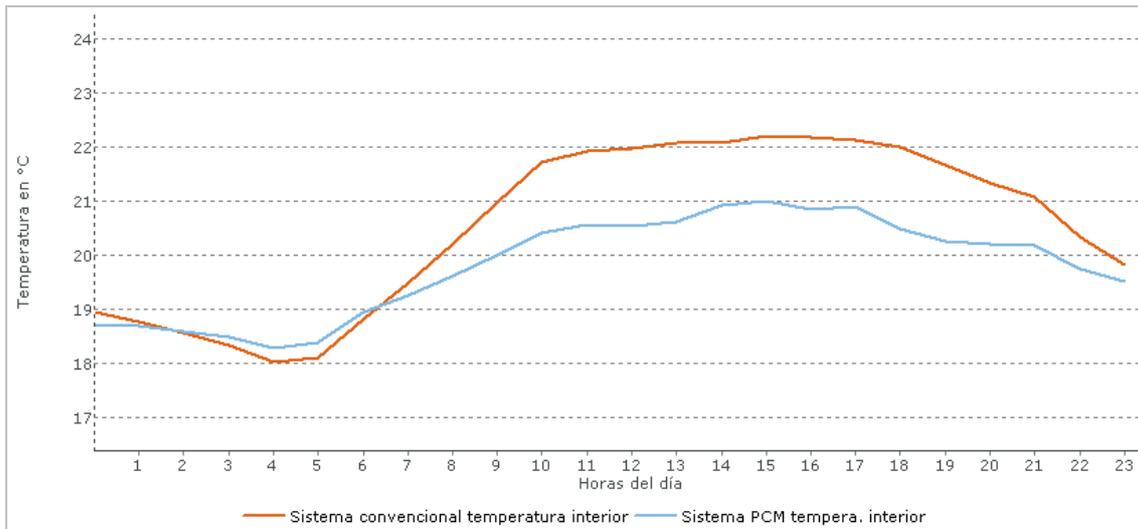
Sistema convencional	Sistema PCM
3.999,32 kW/h	3.605,12 kW/h (-9,9%)

**Valor anual acumulado de energía frigorífica**

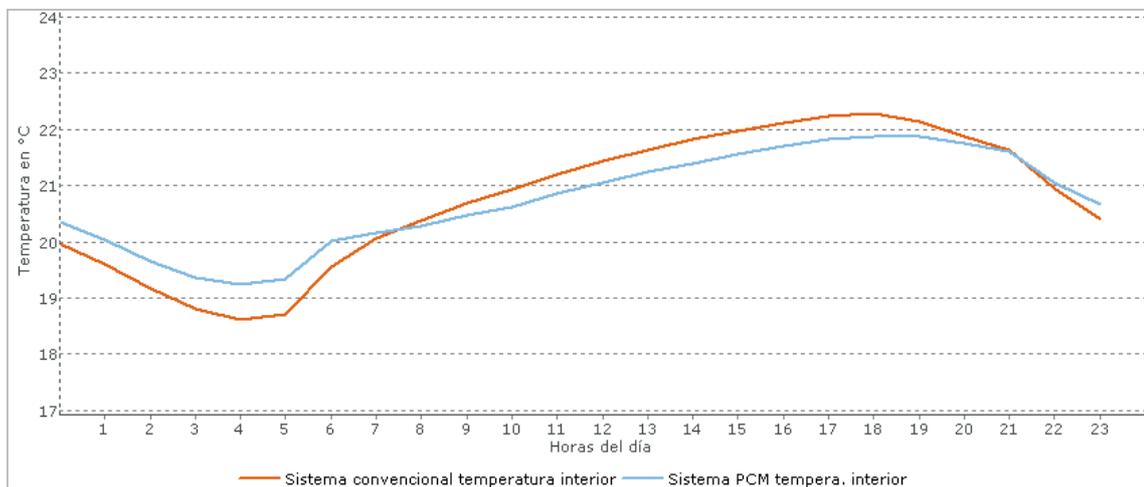
Sistema convencional	Sistema PCM
444,75 kW/h	315,83 kW/h (29%)

**Figura 46:** valores de los gastos de energía con sistema convencional y sistema PCM.

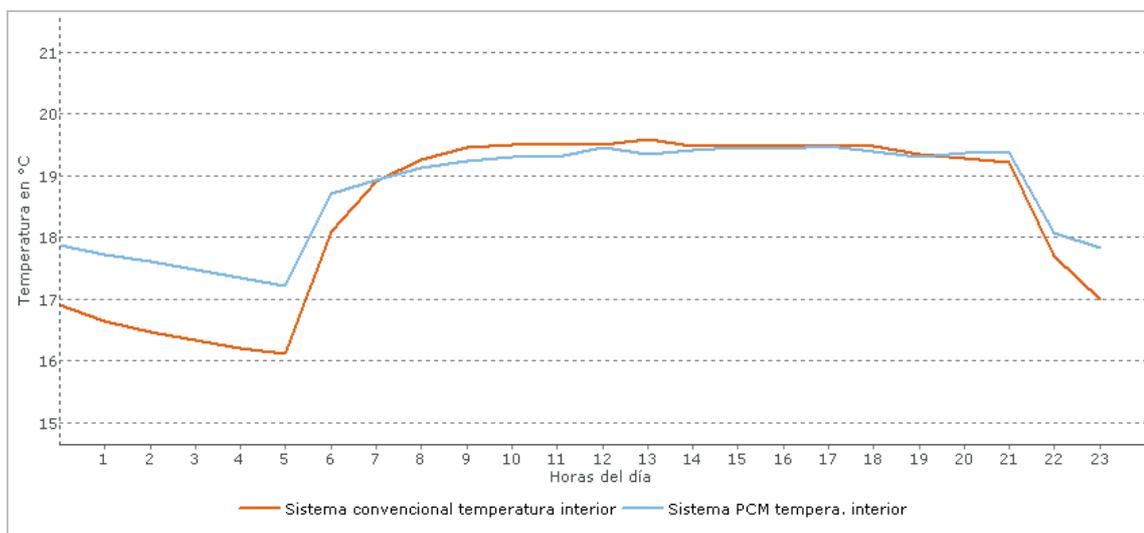
**Datos de las temperaturas en un día.**



**Figura 47:** comparativa de las temperaturas ambientales. Día 17 de junio.



**Figura 48:** comparativa de las temperaturas ambientales. Día 15 de agosto.



**Figura 49:** comparativa de las temperaturas ambientales. Día 15 de enero.

## Smartboard 23.

### Parámetros espaciales.

---

#### **Espacio compuesto 1**

Frecuencia del compuesto: 1

#### **Espacio 1**

Longitud: 10 m  
Anchu.: 10 m  
Altu.: 2 m  
Altura de techo: 2 m  
Pared con altura de techo: 2  
Alineación pared 1: Sur  
Mobiliario: normal  
Tipo de uso: Vivienda Unifamiliar Aislada

#### **Suelo**

Construcción: Losa  
Situación montaje: en contacto con terreno

#### **Pared 1**

Construcción del sistema convencional: Pared ext. ladri. macizo  
Construcción del sistema PCM: Pared ext. ladrillo macizo Smartboard 23 pasivo  
Situación montaje: al aire exterior  
Ventana: existente  
Superficie ventana: 22,5 %  
Factor de sombreado: 0,5  
Tipo ventana: Ventana doble estándar

#### **Pared 2**

Construcción del sistema convencional: Pared ext. ladri. macizo  
Construcción del sistema PCM: Pared ext. ladrillo macizo Smartboard 23 pasivo  
Situación montaje: al aire exterior  
Ventana: existente  
Superficie ventana: 22,5 %  
Factor de sombreado: 0,5  
Tipo ventana: Ventana doble estándar

#### **Pared 3**

Construcción del sistema convencional: Pared ext. ladri. macizo  
Construcción del sistema PCM: Pared ext. ladrillo macizo Smartboard 23 pasivo  
Situación montaje: al aire exterior  
Ventana: no disponible

---

**Pared 4**

Construcción del sistema convencional:	Pared ext. ladri. macizo
Construcción del sistema PCM:	Pared ext. ladrillo macizo Smartboard 23 pasivo
Situación montaje:	al aire exterior
Ventana:	existente
Superficie ventana:	17,5 %
Factor de sombreado:	0,5
Tipo ventana:	Ventana doble estándar

**Tejado**

Construcción del sistema convencional:	Tejado inclinado
Construcción del sistema PCM:	Tejado muy inclinado Smartboard 23 pasivo
Situación montaje:	al aire exterior
Ventana:	no disponible

**Rentabilidad**

**Inversiones**

Inversión total:	8000 € (para 20 a)	7000 € (para 20 a)
------------------	--------------------	--------------------

**Costes variables**

Costes calor:	0,12 €/kWh	0,12 €/kWh
Calor necesario determinado:	3593,78 kWh/a	3999,32 kWh/a
Costes frío:	0,12 €/kWh	0,12 €/kWh
Frío necesario determinado:	248,77 kWh/a	444,75 kWh/a
Otros:	0 €	0 €
Costes explotación:	0 % de las inversiones	2 % de las inversiones

**Carestía**

Costes calor:	10 %
Costes frío:	7 %
Inversiones:	2 %
Costes explotación:	4 %

**Condi. marginales**

Otros:	2 %
Interés:	2 %
Tiempo de observación:	20 a

**Resultado de la rentabilidad**

Tiempo de amortización	4,4 años
Valor de capital	5346,75 euros
Réditos	34,20 %

**Tabla 8:** resultados de la rentabilidad de utilizar el sistema Smartboard 23.

### Dinero acumulado (euros & años)

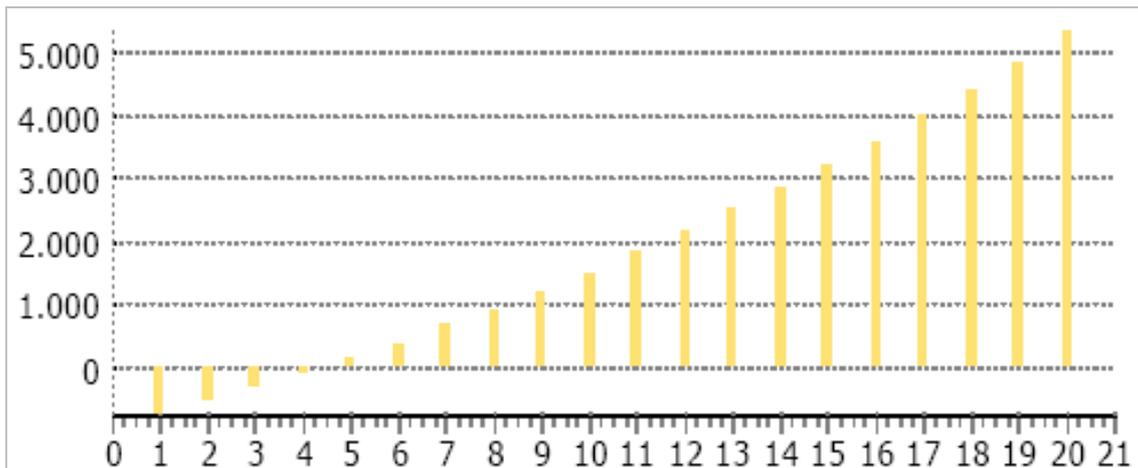


Figura 50: dinero acumulado en cada año por el uso del sistema Smartboard 23.

### Representación de la rentabilidad

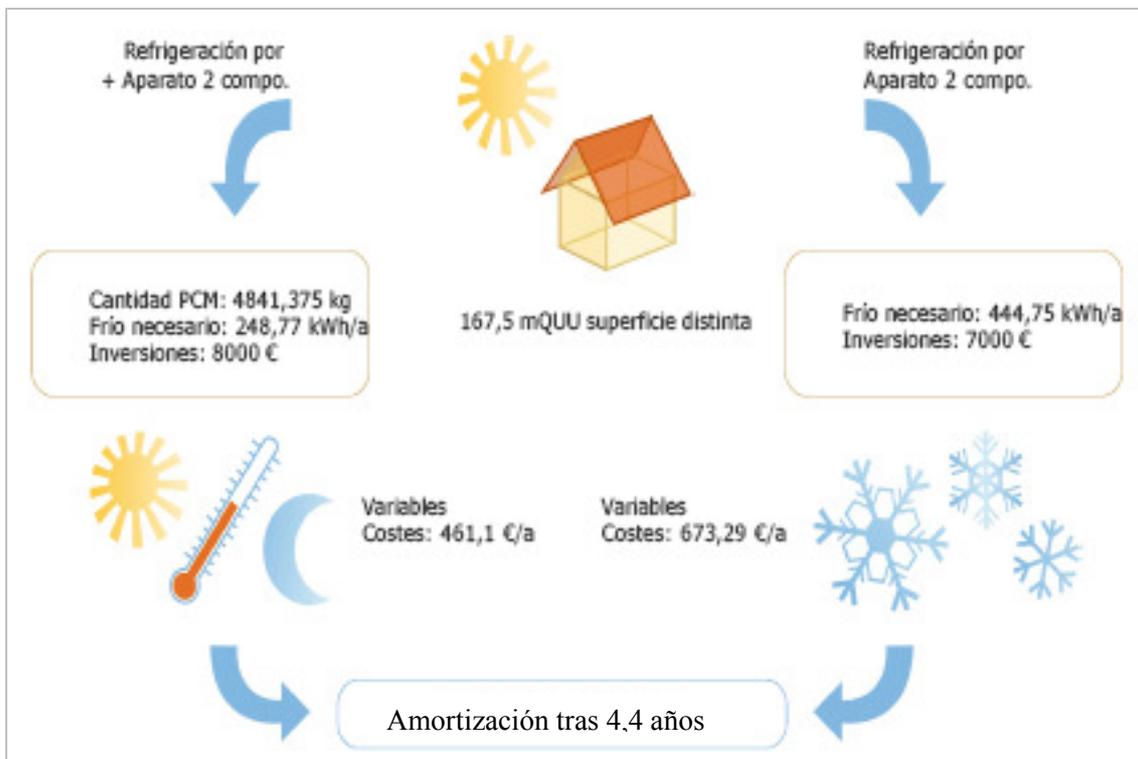
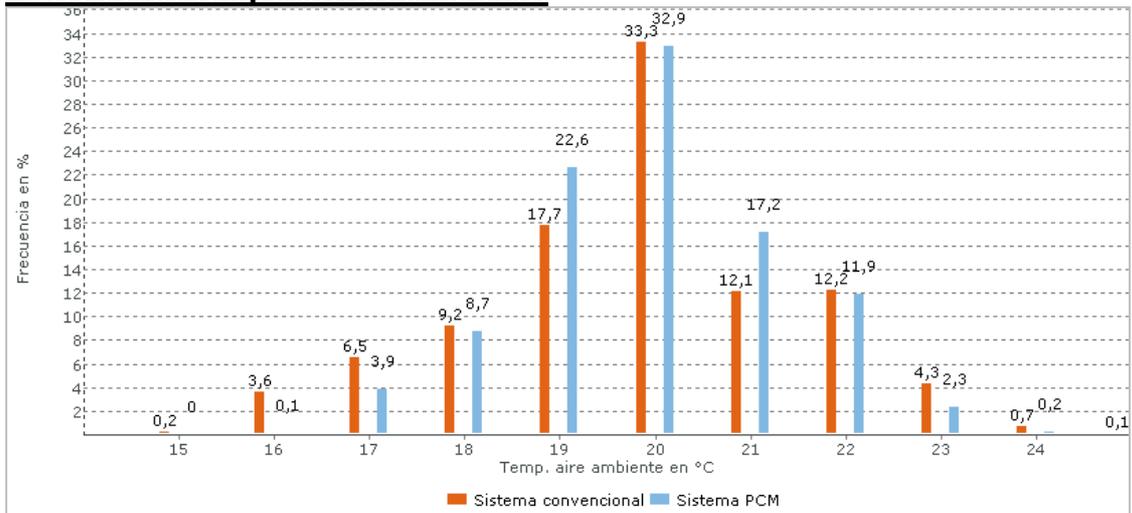


Figura 51: representación de la rentabilidad por el uso del sistema Smartboard 23.

**Datos de las temperaturas ambiente.**



**Temperaturas en el margen de confort (21-26°C)**

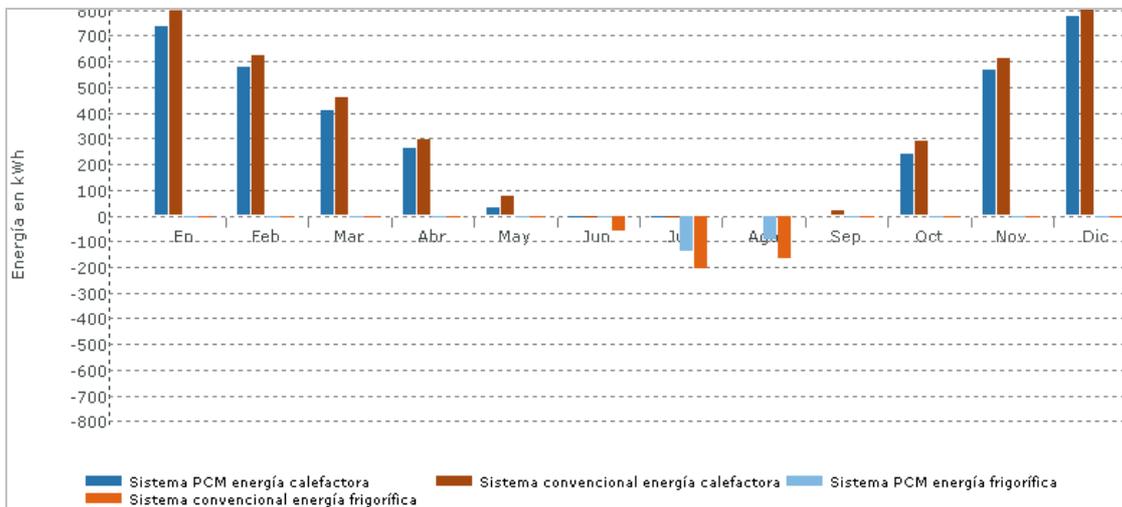
Sistema convencional	Sistema PCM
29,4,5% (2.575 h)	31,7% (2.777 h)

**Temperaturas superiores al margen de confort (>26°C)**

Sistema convencional	Sistema PCM
0% (0 h)	0% (0 h)

**Figura 52:** porcentaje de la frecuencia de permanencia de las temperaturas ambientales.

**Datos de los gastos de energía.**



**Valor anual acumulado de energía calorífica**

Sistema convencional	Sistema PCM
3.999,32 kW/h	3.593,78 kW/h (-10,1%)

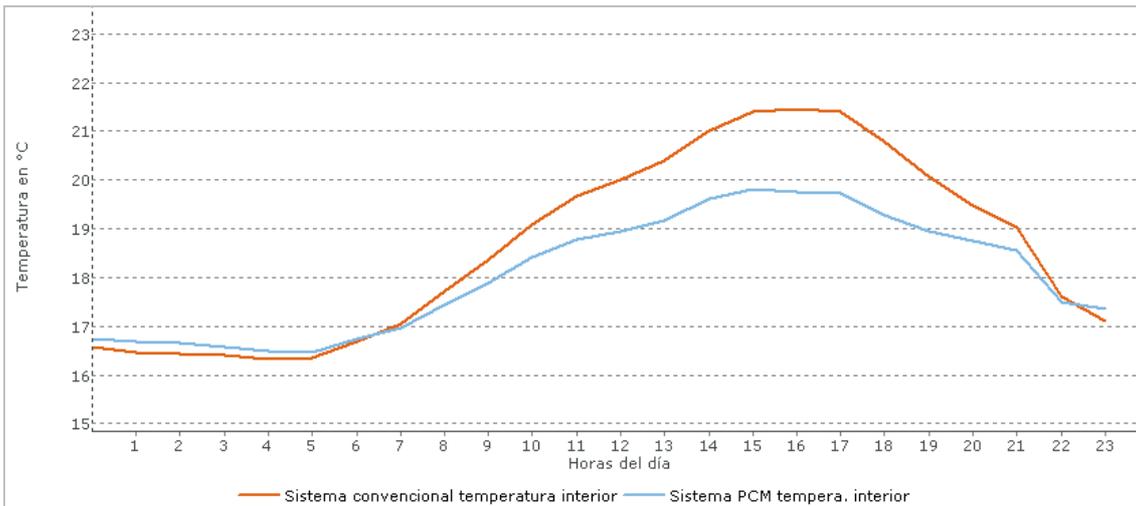
**Valor anual acumulado de energía frigorífica**

Sistema convencional	Sistema PCM
444,75 kW/h	248,77 kW/h (44,4%)

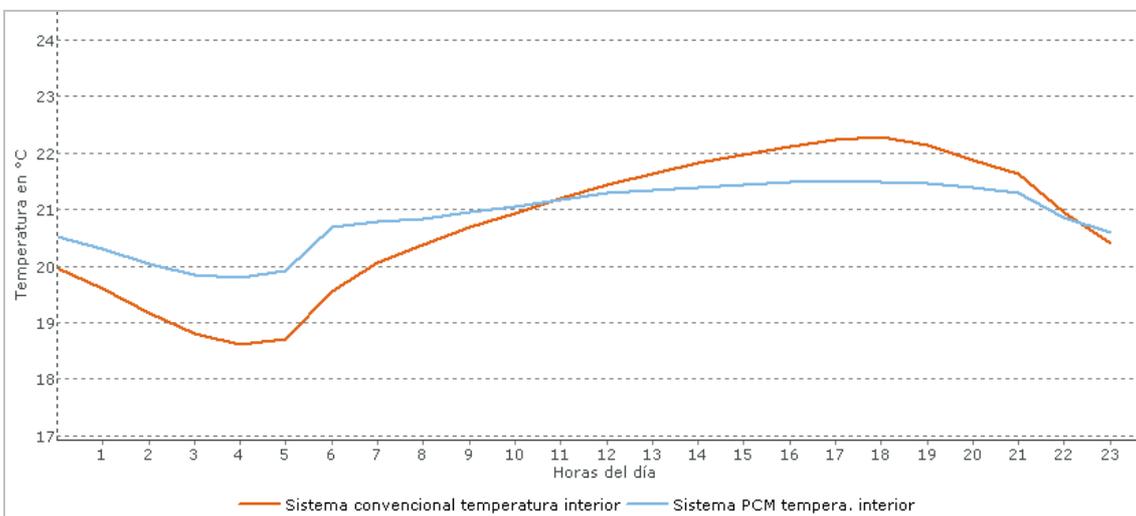
**Figura 53:** valores de los gastos de energía con sistema convencional y sistema PCM.

## 42 ANEXO VII: Resultados obtenidos de cada simulación creada con el programa PCM EXPRESS

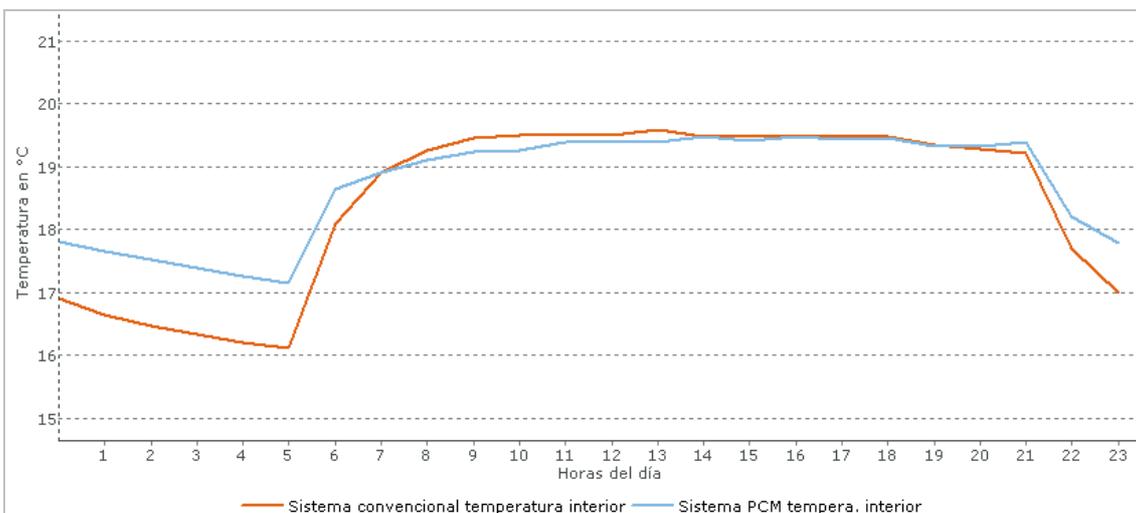
### Datos de las temperaturas en un día.



**Figura 54:** comparativa de las temperaturas ambientales. Día 10 de mayo.



**Figura 55:** comparativa de las temperaturas ambientales. Día 15 de agosto.



**Figura 56:** comparativa de las temperaturas ambientales. Día 15 de enero.

## **Smartboard 26.**

### **Parámetros espaciales.**

---

#### **Espacio compuesto 1**

Frecuencia del compuesto: 1

#### **Espacio 1**

Longitud: 10 m  
Anchu.: 10 m  
Altu.: 2 m  
Altura de techo: 2 m  
Pared con altura de techo: 2  
Alineación pared 1: Sur  
Mobiliario: normal  
Tipo de uso: Vivienda Unifamiliar Aislada

#### **Suelo**

Construcción: Losa  
Situación montaje: en contacto con terreno

#### **Pared 1**

Construcción del sistema convencional: Pared ext. ladri. macizo  
Construcción del sistema PCM: Pared ext. ladrillo macizo Smartboard 26 pasivo  
Situación montaje: al aire exterior  
Ventana: existente  
Superficie ventana: 22,5 %  
Factor de sombreado: 0,5  
Tipo ventana: Ventana doble estándar

#### **Pared 2**

Construcción del sistema convencional: Pared ext. ladri. macizo  
Construcción del sistema PCM: Pared ext. ladrillo macizo Smartboard 26 pasivo  
Situación montaje: al aire exterior  
Ventana: existente  
Superficie ventana: 22,5 %  
Factor de sombreado: 0,5  
Tipo ventana: Ventana doble estándar

#### **Pared 3**

Construcción del sistema convencional: Pared ext. ladri. macizo  
Construcción del sistema PCM: Pared ext. ladrillo macizo Smartboard 26 pasivo  
Situación montaje: al aire exterior  
Ventana: no disponible

---

44 ANEXO VII: Resultados obtenidos de cada simulación creada con el programa PCM EXPRESS

**Pared 4**

Construcción del sistema convencional:	Pared ext. ladri. macizo
Construcción del sistema PCM:	Pared ext. ladrillo macizo Smartboard 26 pasivo
Situación montaje:	al aire exterior
Ventana:	existente
Superficie ventana:	17,5 %
Factor de sombreado:	0,5
Tipo ventana:	Ventana doble estándar

**Tejado**

Construcción del sistema convencional:	Tejado inclinado
Construcción del sistema PCM:	Tejado inclinado Smartboard 26 pasivo
Situación montaje:	al aire exterior
Ventana:	no disponible

**Rentabilidad**

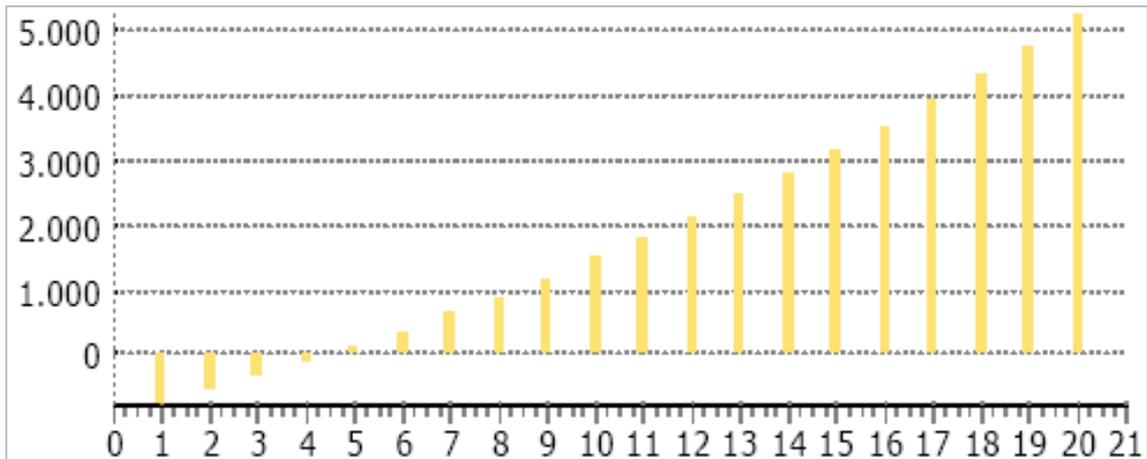
	<b>Sistema PCM</b>	<b>Sistema convencional</b>
<b>Inversiones</b>		
Inversión total:	8000 € (para 20 a)	7000 € (para 20 a)
<b>Costes variables</b>		
Costes calor:	0,12 €/kWh	0,12 €/kWh
Calor necesario determinado:	3594,99 kWh/a	3999,32 kWh/a
Costes frío:	0,12 €/kWh	0,12 €/kWh
Frío necesario determinado:	274,57 kWh/a	444,75 kWh/a
Otros:	0 €	0 €
Costes explotación:	0 % de las inversiones	2 % de las inversiones
<b>Carestía</b>		
Costes calor:	10 %	
Costes frío:	7 %	
Inversiones:	2 %	
Costes explotación:	4 %	
<b>Condi. marginales</b>		
Otros:	2 %	
Interés:	2 %	
Tiempo de observación:	20 a	

**Resultado de la rentabilidad**

Tiempo de amortización	4,5 años
Valor de capital	5238,86 euros
Réditos	33,52 %

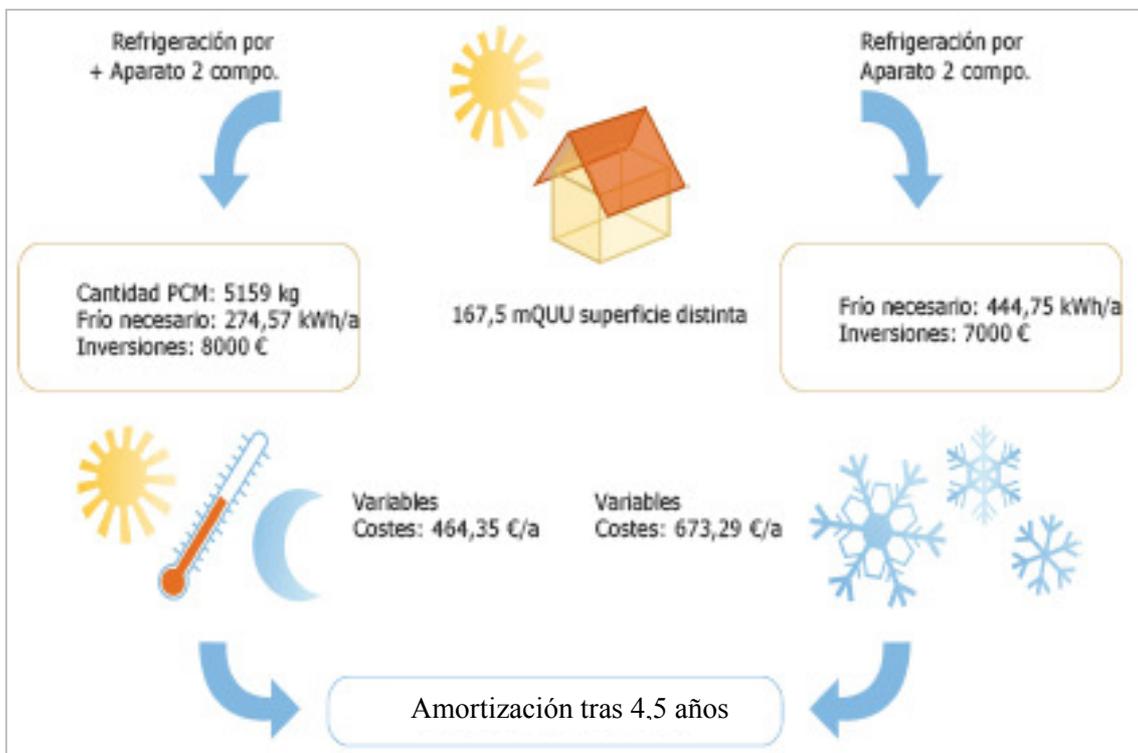
**Tabla 9:** resultados de la rentabilidad de utilizar el sistema Smartboard 26.

### Dinero acumulado (euros & años)



*Figura 57:* dinero acumulado en cada año por el uso del sistema Smartboard 26.

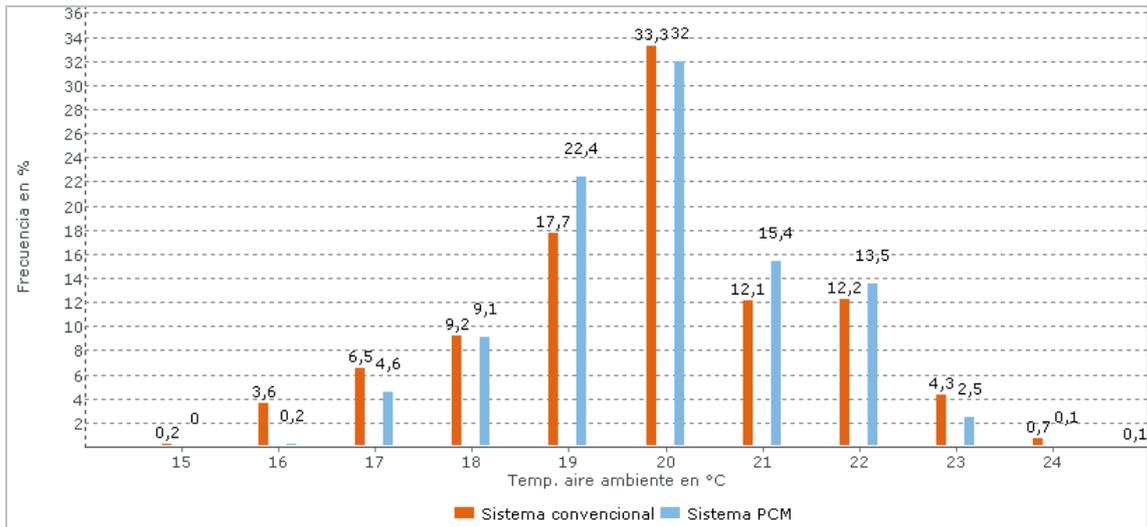
### Representación de la rentabilidad



*Figura 58:* representación de la rentabilidad por el uso del sistema Smartboard 26.

46 **ANEXO VII: Resultados obtenidos de cada simulación creada con el programa PCM EXPRESS**

**Datos de las temperaturas ambiente.**



**Temperaturas en el margen de confort (21-26°C)**

Sistema convencional  
29,4% (2.575 h)

Sistema PCM  
31,6% (2.768 h)

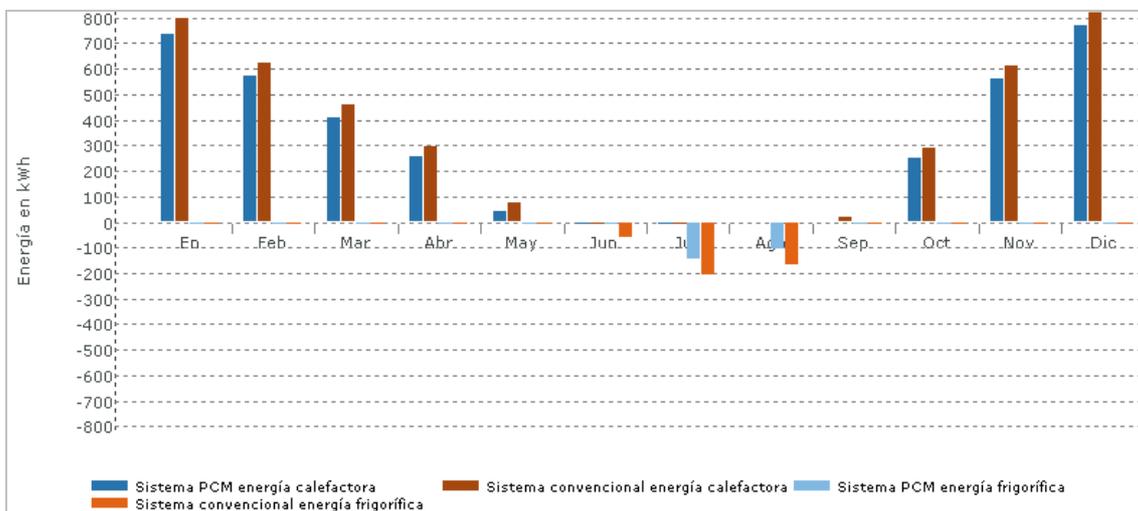
**Temperaturas superiores al margen de confort (>26°C)**

Sistema convencional  
0% (0 h)

Sistema PCM  
0% (0 h)

Figura 59: porcentaje de la frecuencia de permanencia de las temperaturas ambientales.

**Datos de los gastos de energía.**



**Valor anual acumulado de energía calorífica**

Sistema convencional  
3.999,32 kW/h

Sistema PCM  
3.594,99 kW/h (-10,1%)

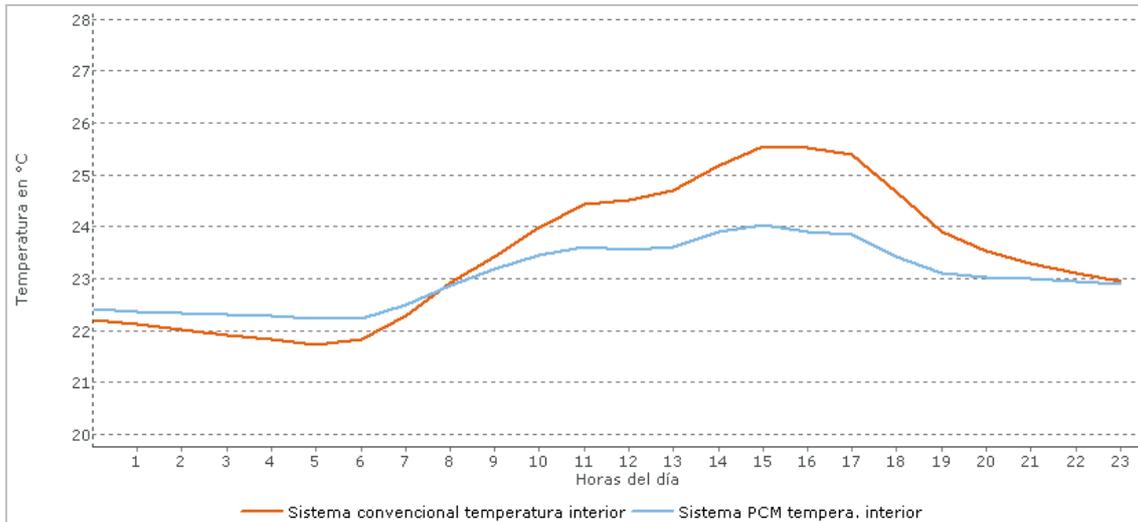
**Valor anual acumulado de energía frigorífica**

Sistema convencional  
444,75 kW/h

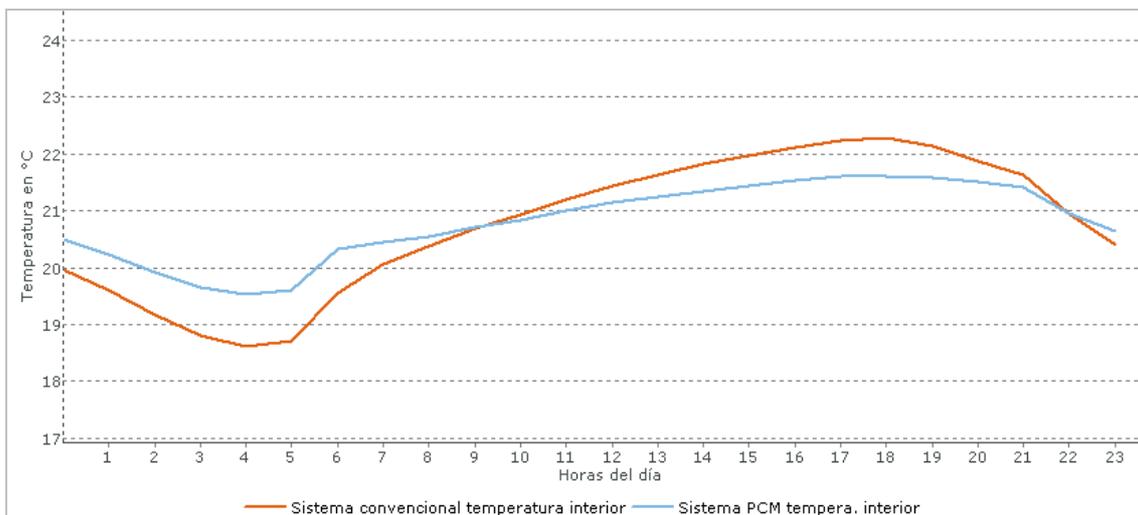
Sistema PCM  
274,57 kW/h (-38,3%)

Figura 60: valores de los gastos de energía con sistema convencional y sistema PCM.

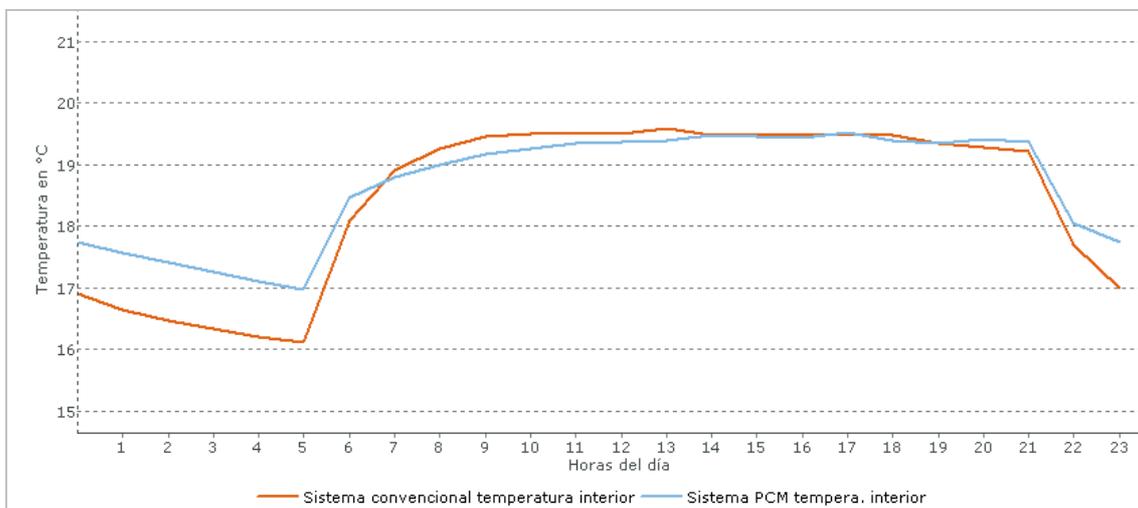
**Datos de las temperaturas en un día.**



**Figura 61:** comparativa de las temperaturas ambientales. Día 3 de septiembre.



**Figura 62:** comparativa de las temperaturas ambientales. Día 15 de agosto.



**Figura 63:** comparativa de las temperaturas ambientales. Día 15 de enero.

## 1.2 Cara exterior.

### Smartboard 21.

#### Parámetros espaciales.

---

##### **Espacio compuesto 1**

Frecuencia del compuesto: 1

##### **Espacio 1**

Longitud: 10 m  
Anchu.: 10 m  
Altu.: 2 m  
Altura de techo: 2 m  
Pared con altura de techo: 2  
Alineación pared 1: Sur  
Mobiliario: normal  
Tipo de uso: Vivienda Unifamiliar Aislada

##### **Suelo**

Construcción: Losa  
Situación montaje: en contacto con terreno

##### **Pared 1**

Construcción del sistema convencional: Pared ext. ladri. macizo (ext)  
Construcción del sistema PCM: Pared ext. ladri. macizo Smartboard 21 activo (ext)  
Situación montaje: al aire exterior  
Ventana: existente  
Superficie ventana: 22,5 %  
Factor de sombreado: 0,5  
Tipo ventana: Ventana doble estándar

##### **Pared 2**

Construcción del sistema convencional: Pared ext. ladri. macizo (ext)  
Construcción del sistema PCM: Pared ext. ladri. macizo Smartboard 21 activo (ext)  
Situación montaje: al aire exterior  
Ventana: existente  
Superficie ventana: 22,5 %  
Factor de sombreado: 0,5  
Tipo ventana: Ventana doble estándar

##### **Pared 3**

Construcción del sistema convencional: Pared ext. ladri. macizo (ext)  
Construcción del sistema PCM: Pared ext. ladri. macizo Smartboard 21 activo (ext)  
Situación montaje: al aire exterior  
Ventana: no disponible

---

**Pared 4**

Construcción del sistema convencional:	Pared ext. ladri. macizo (ext)
Construcción del sistema PCM:	Pared ext. ladri. macizo Smartboard 21 activo (ext
Situación montaje:	al aire exterior
Ventana:	existente
Superficie ventana:	17,5 %
Factor de sombreado:	0,5
Tipo ventana:	Ventana doble estándar

**Tejado**

Construcción del sistema convencional:	Tejado inclinado
Construcción del sistema PCM:	Tejado inclinado Smartboard 21 activo
Situación montaje:	al aire exterior
Ventana:	no disponible

**Rentabilidad**

	<b>Sistema PCM</b>	<b>Sistema convencional</b>
<b>Inversiones</b>		
Inversión total:	8000 € (para 20 a)	7000 € (para 20 a)
<b>Costes variables</b>		
Costes calor:	0,12 €/kWh	0,12 €/kWh
Calor necesario determinado:	3581,54 kWh/a	3975,32 kWh/a
Costes frío:	0,12 €/kWh	0,12 €/kWh
Frío necesario determinado:	328,32 kWh/a	458,4 kWh/a
Otros:	0 €	0 €
Costes explotación:	0 % de las inversiones	2 % de las inversiones
<b>Carestía</b>		
Costes calor:	10 %	
Costes frío:	7 %	
Inversiones:	2 %	
Costes explotación:	4 %	
<b>Condi. marginales</b>		
Otros:	2 %	
Interés:	2 %	
Tiempo de observación:	20 a	

**Resultado de la rentabilidad**

Tiempo de amortización	4,6 años
Valor de capital	5024,40 euros
Réditos	32,53 %

**Tabla 10:** resultados de la rentabilidad de utilizar el sistema Smartboard 21.

### Dinero acumulado (euros & años)

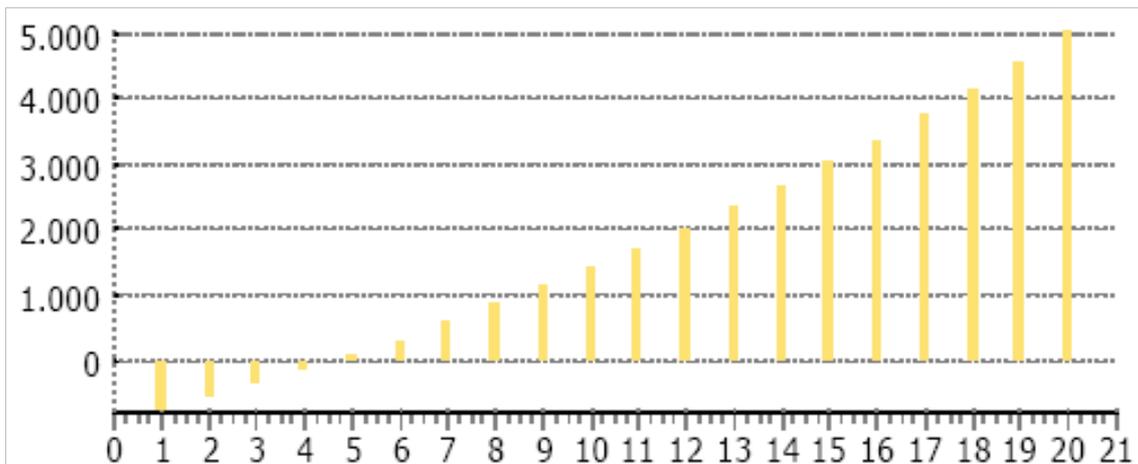


Figura 64: dinero acumulado en cada año por el uso del sistema Smartboard 21.

### Representación de la rentabilidad

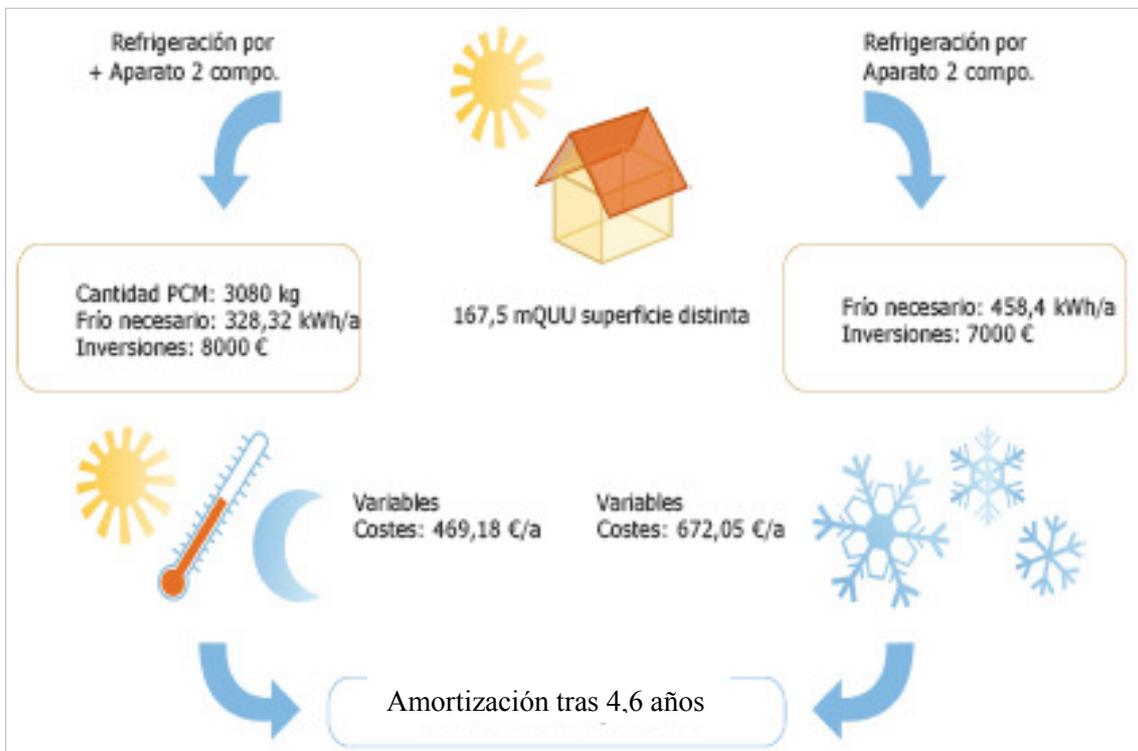
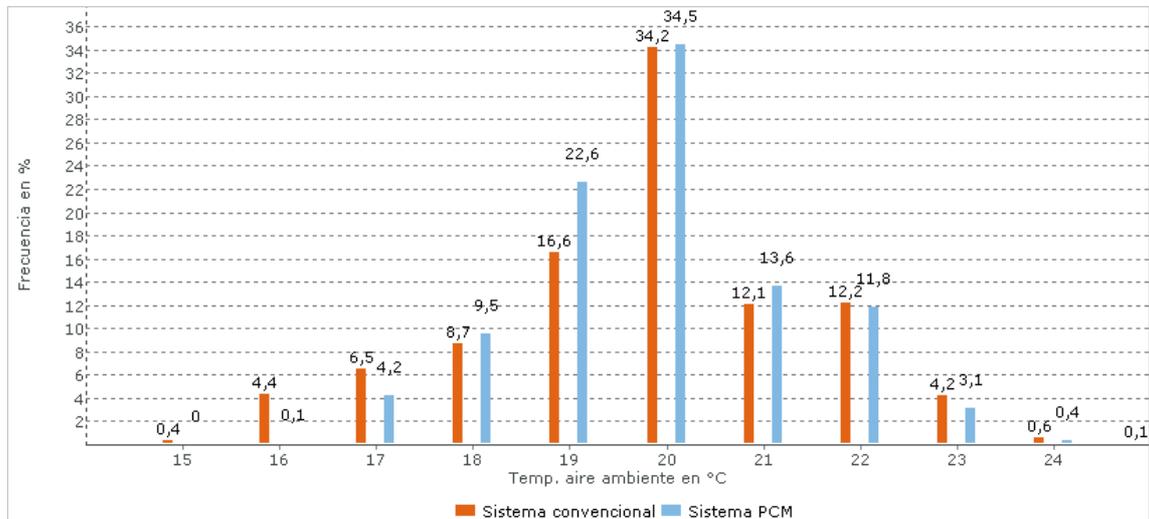


Figura 65: representación de la rentabilidad por el uso del sistema Smartboard 21.

**Datos de las temperaturas ambiente.**



**Temperaturas en el margen de confort (21-26°C)**

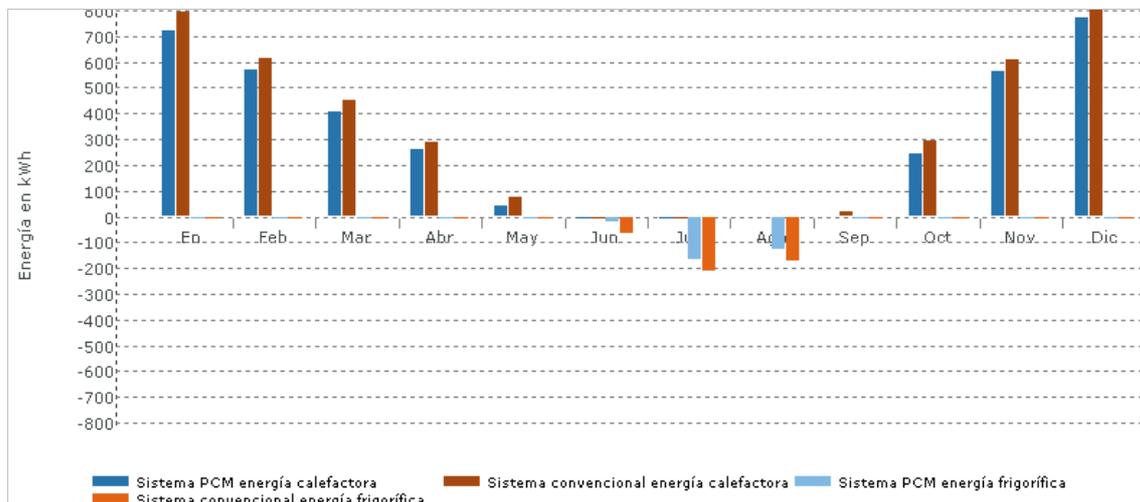
Sistema convencional	Sistema PCM
29,3% (2.567 h)	29,1% (2.549 h)

**Temperaturas superiores al margen de confort (>26°C)**

Sistema convencional	Sistema PCM
0% (0 h)	0% (0 h)

**Figura 66:** porcentaje de la frecuencia de permanencia de las temperaturas ambientales.

**Datos de los gastos de energía.**



**Valor anual acumulado de energía calorífica**

Sistema convencional	Sistema PCM
3.975,32 kW/h	3.581,54 kW/h (-9,9%)

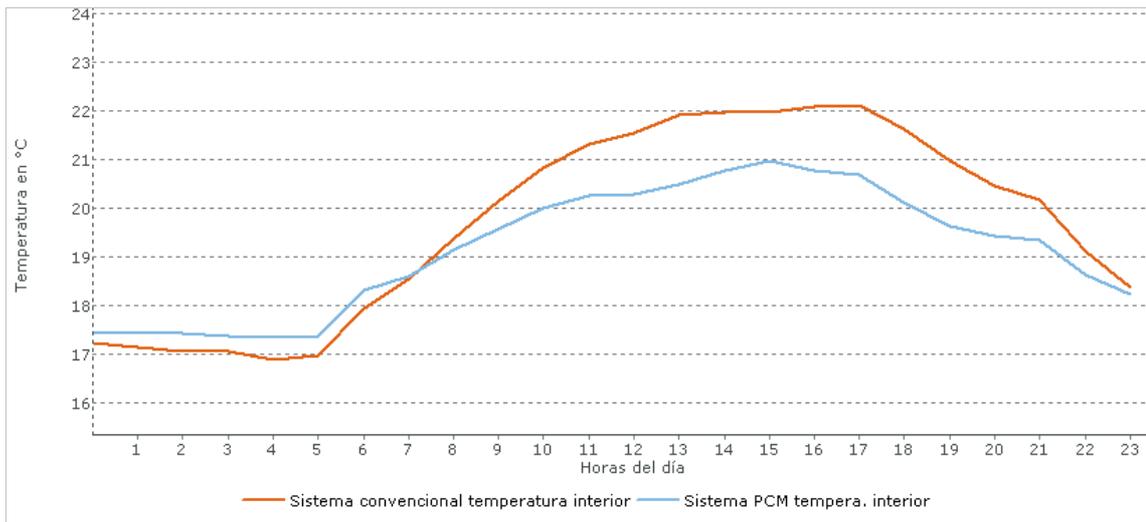
**Valor anual acumulado de energía frigorífica**

Sistema convencional	Sistema PCM
458,40 kW/h	328,32 kW/h (-28,4%)

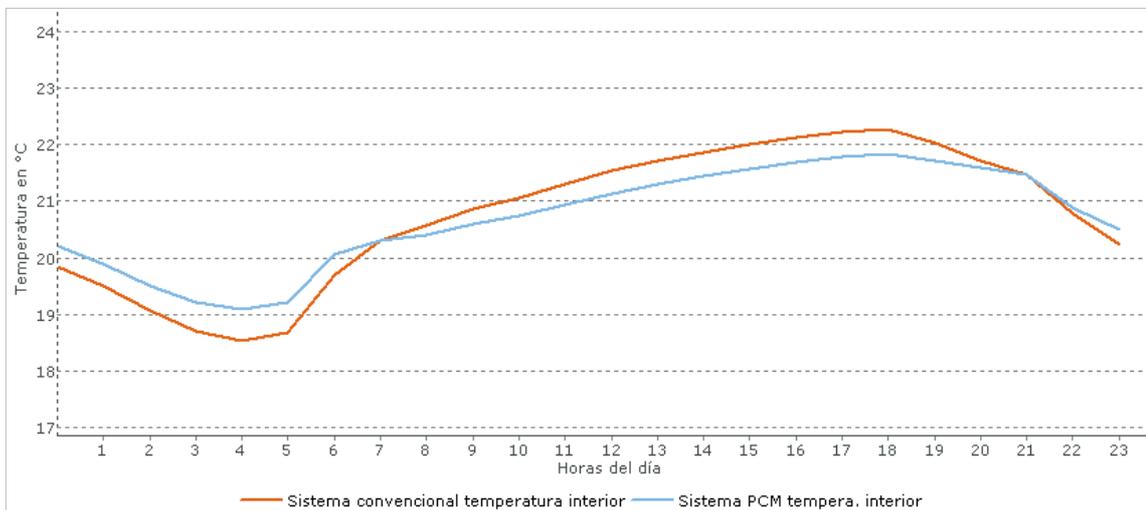
**Figura 67:** valores de los gastos de energía con sistema convencional y sistema PCM.

52 ANEXO VII: Resultados obtenidos de cada simulación creada con el programa PCM EXPRESS

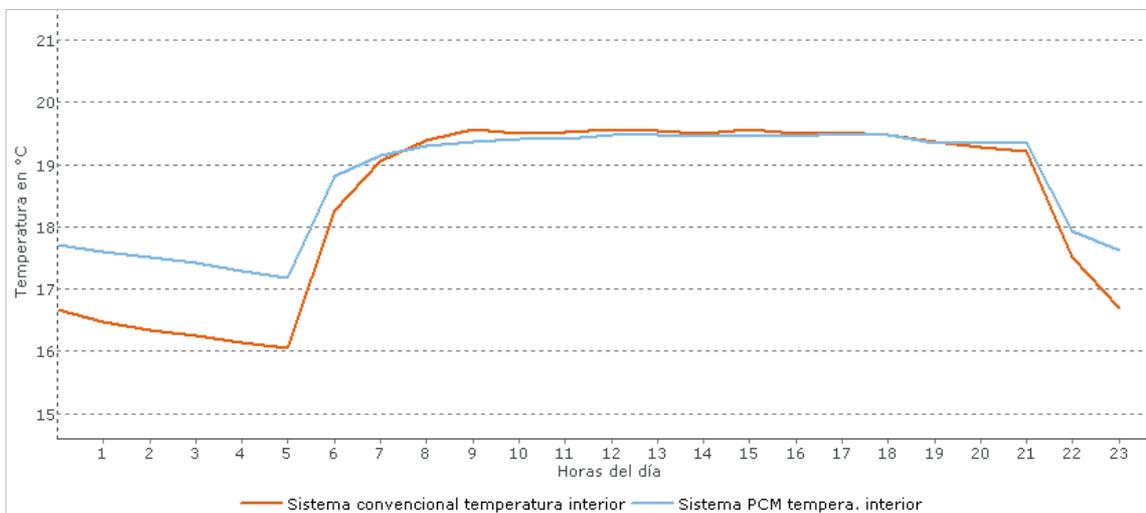
**Datos de las temperaturas en un día.**



**Figura 68:** comparativa de las temperaturas ambientales. Día 11 de junio.



**Figura 69:** comparativa de las temperaturas ambientales. Día 15 de agosto.



**Figura 70:** comparativa de las temperaturas ambientales. Día 15 de enero.

## Smartboard 23.

### Parámetros espaciales.

---

#### **Espacio compuesto 1**

Frecuencia del compuesto: 1

#### **Espacio 1**

Longitud: 10 m  
Anchu.: 10 m  
Altu.: 2 m  
Altura de techo: 2 m  
Pared con altura de techo: 2  
Alineación pared 1: Sur  
Mobiliario: normal  
Tipo de uso: Vivienda Unifamiliar Aislada

#### **Suelo**

Construcción: Losa  
Situación montaje: en contacto con terreno

#### **Pared 1**

Construcción del sistema convencional: Pared ext. ladri. macizo (ext)  
Construcción del sistema PCM: Pared ext. ladri. macizo Smartboard 23 activo (ext  
Situación montaje: al aire exterior  
Ventana: existente  
Superficie ventana: 22,5 %  
Factor de sombreado: 0,5  
Tipo ventana: Ventana doble estándar

#### **Pared 2**

Construcción del sistema convencional: Pared ext. ladri. macizo (ext)  
Construcción del sistema PCM: Pared ext. ladri. macizo Smartboard 23 activo (ext  
Situación montaje: al aire exterior  
Ventana: existente  
Superficie ventana: 22,5 %  
Factor de sombreado: 0,5  
Tipo ventana: Ventana doble estándar

#### **Pared 3**

Construcción del sistema convencional: Pared ext. ladri. macizo (ext)  
Construcción del sistema PCM: Pared ext. ladri. macizo Smartboard 23 activo (ext  
Situación montaje: al aire exterior  
Ventana: no disponible

---

54 ANEXO VII: Resultados obtenidos de cada simulación creada con el programa PCM EXPRESS

**Pared 4**

Construcción del sistema convencional:	Pared ext. ladri. macizo (ext)
Construcción del sistema PCM:	Pared ext. ladri. macizo Smartboard 23 activo (ext
Situación montaje:	al aire exterior
Ventana:	existente
Superficie ventana:	17,5 %
Factor de sombreado:	0,5
Tipo ventana:	Ventana doble estándar

**Tejado**

Construcción del sistema convencional:	Tejado inclinado
Construcción del sistema PCM:	Tejado muy inclinado Smartboard 23 pasivo
Situación montaje:	al aire exterior
Ventana:	no disponible

**Rentabilidad**

**Inversiones**

Inversión total:	8000 € (para 20 a)	7000 € (para 20 a)
------------------	--------------------	--------------------

**Costes variables**

Costes calor:	0,12 €/kWh	0,12 €/kWh
Calor necesario determinado:	3573,94 kWh/a	3975,32 kWh/a
Costes frío:	0,12 €/kWh	0,12 €/kWh
Frío necesario determinado:	289,03 kWh/a	458,4 kWh/a
Otros:	0 €	0 €
Costes explotación:	0 % de las inversiones	2 % de las inversiones

**Carestía**

Costes calor:	10 %
Costes frío:	7 %
Inversiones:	2 %
Costes explotación:	4 %

**Condi. marginales**

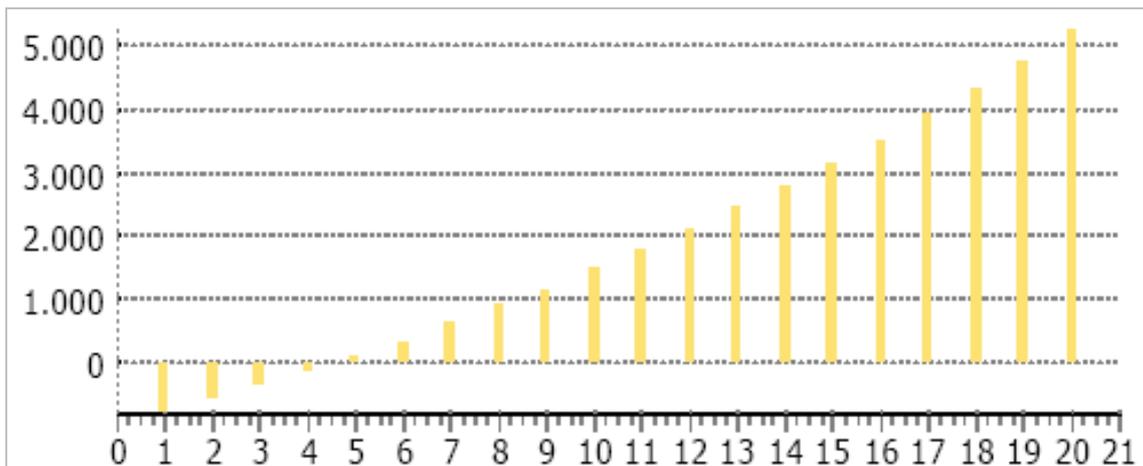
Otros:	2 %
Interés:	2 %
Tiempo de observación:	20 a

**Resultado de la rentabilidad**

Tiempo de amortización	4,5 años
Valor de capital	5219,73 euros
Réditos	33,52 %

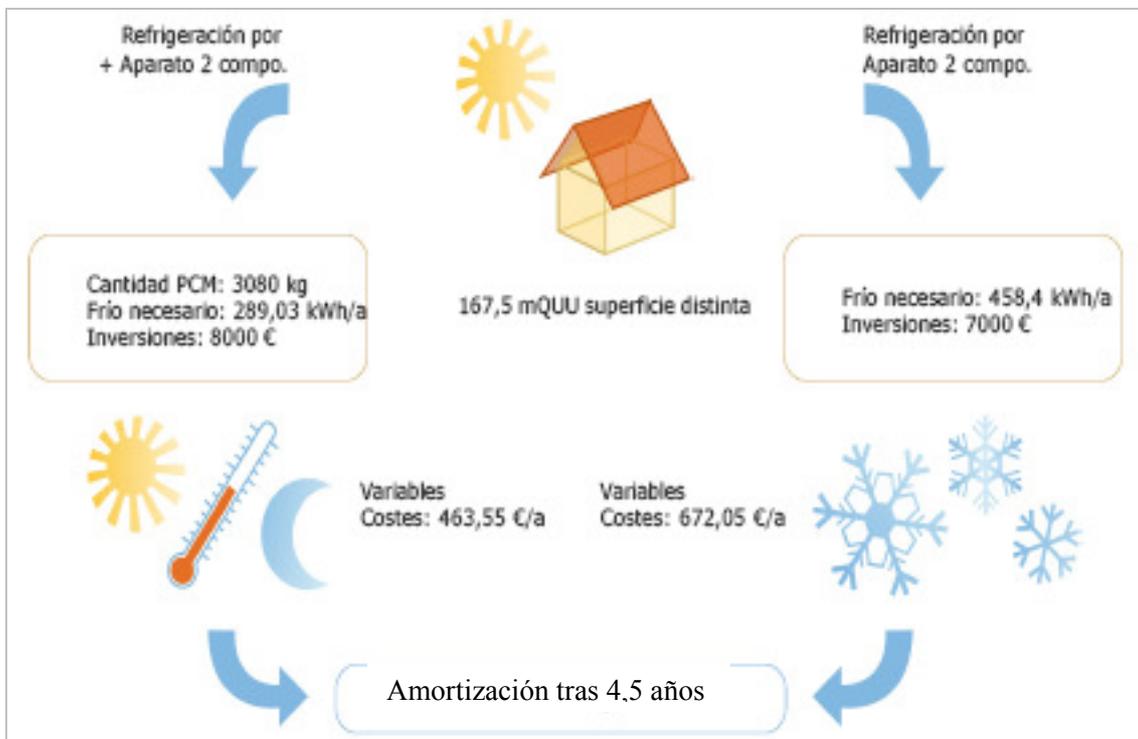
**Tabla 11:** resultados de la rentabilidad de utilizar el sistema Smartboard 23.

### Dinero acumulado (euros & años)



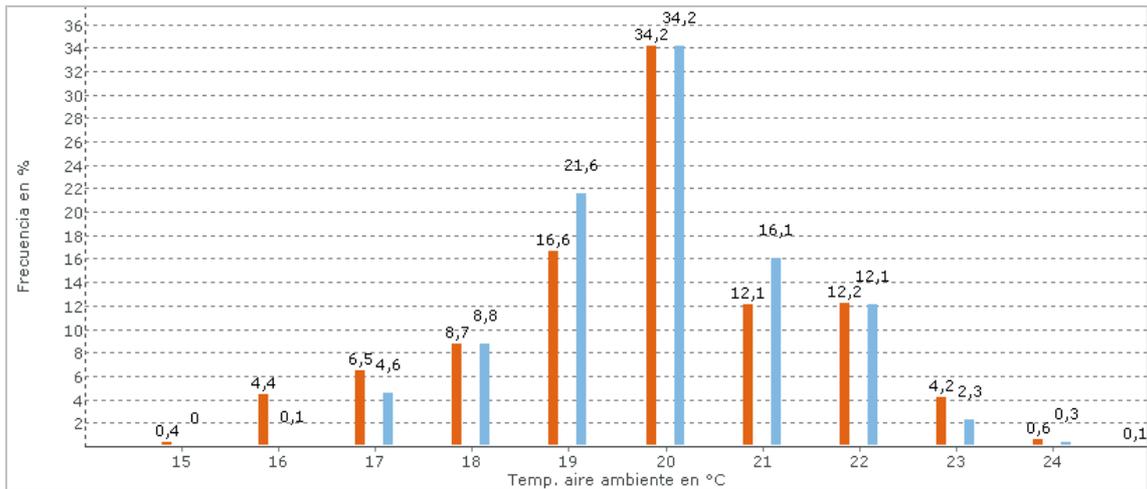
*Figura 71:* dinero acumulado en cada año por el uso del sistema Smartboard 23.

### Representación de la rentabilidad



*Figura 72:* representación de la rentabilidad por el uso del sistema Smartboard 23.

**Datos de las temperaturas ambiente.**



**Temperaturas en el margen de confort (21-26°C)**

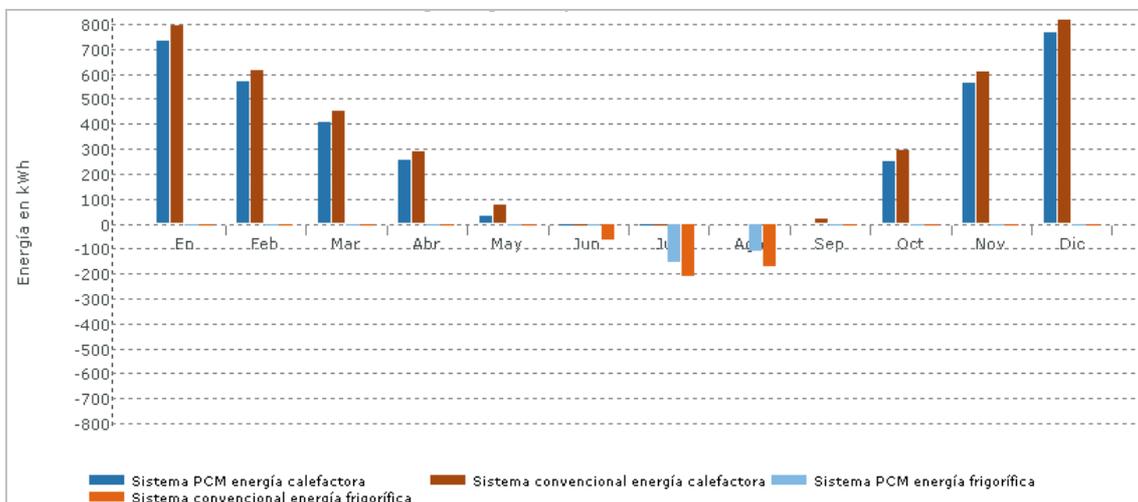
Sistema convencional 29,3% (2.567 h)	Sistema PCM 30,8% (2.698 h)
---	--------------------------------

**Temperaturas superiores al margen de confort (>26°C)**

Sistema convencional 0% (0 h)	Sistema PCM 0% (0 h)
----------------------------------	-------------------------

**Figura 73:** porcentaje de la frecuencia de permanencia de las temperaturas ambientales.

**Datos de los gastos de energía.**



**Valor anual acumulado de energía calorífica**

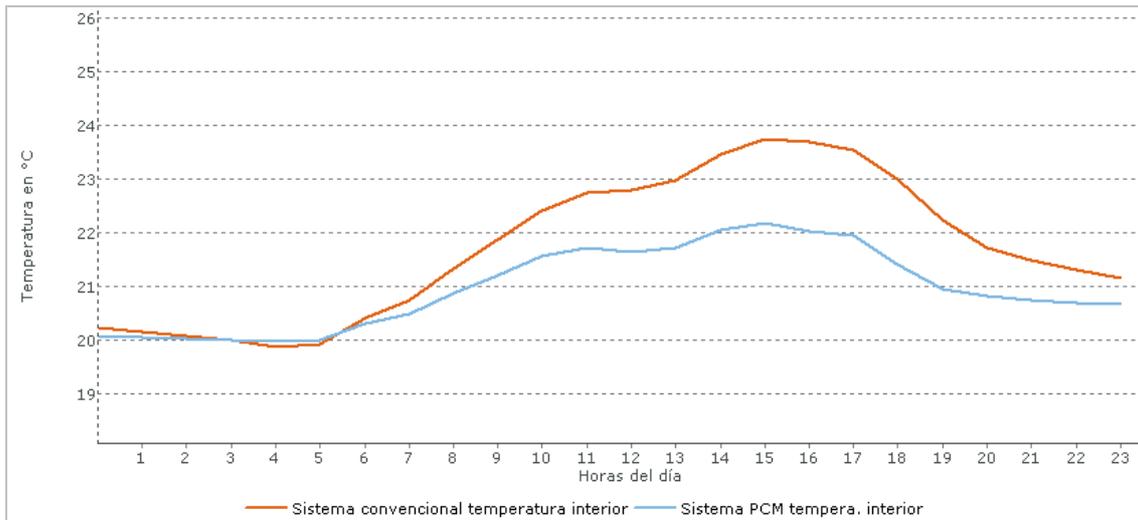
Sistema convencional 3.975,32 kW/h	Sistema PCM 3.573,94 kW/h (-10,1%)
---------------------------------------	---------------------------------------

**Valor anual acumulado de energía frigorífica**

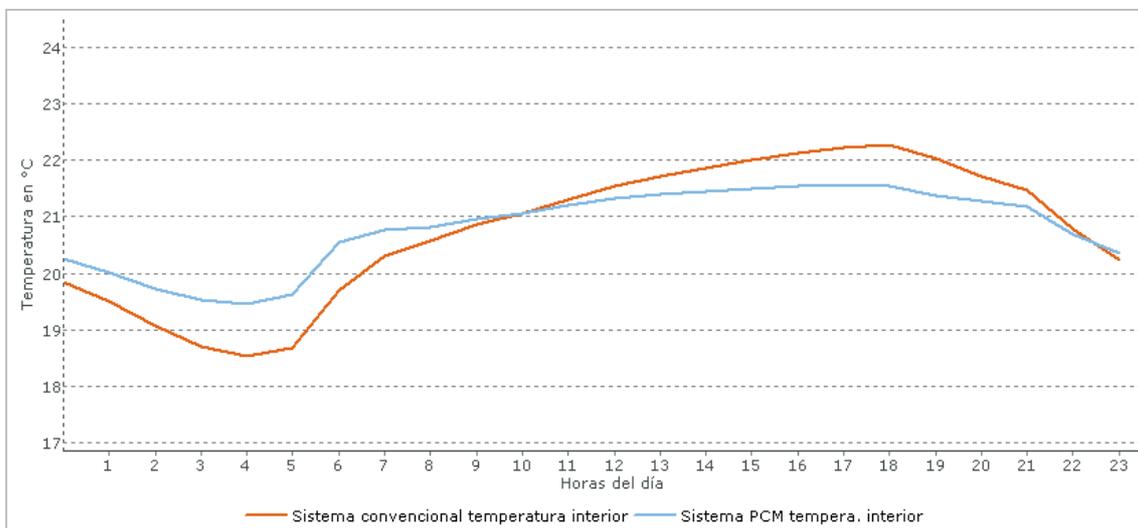
Sistema convencional 458,40 kW/h	Sistema PCM 289,03 kW/h (-36,9%)
-------------------------------------	-------------------------------------

**Figura 74:** valores de los gastos de energía con sistema convencional y sistema PCM.

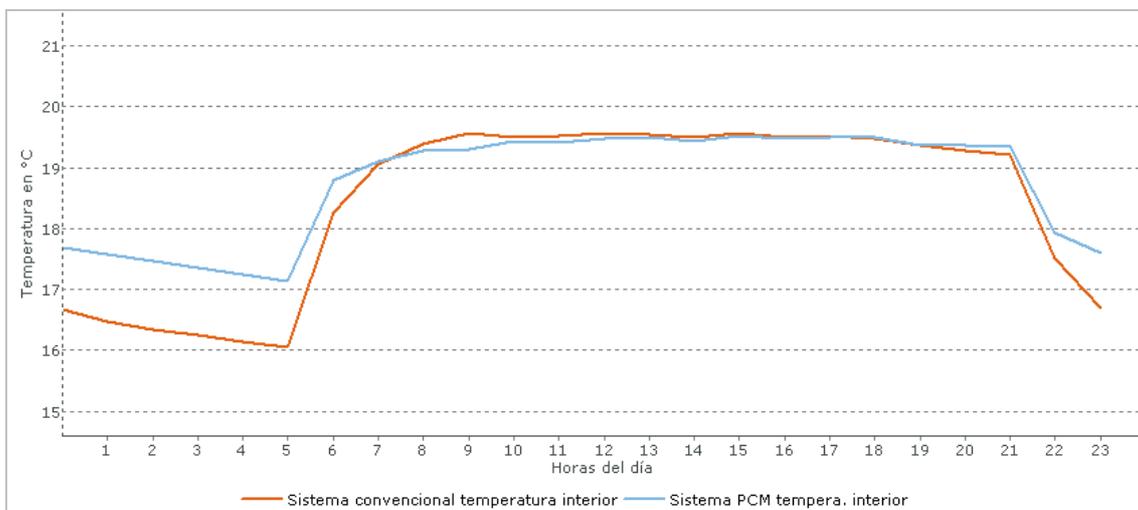
**Datos de las temperaturas en un día.**



**Figura 75:** comparativa de las temperaturas ambientales. Día 10 de mayo.



**Figura 76:** comparativa de las temperaturas ambientales. Día 15 de agosto.



**Figura 77:** comparativa de las temperaturas ambientales. Día 15 de enero.

## Smartboard 26.

### Parámetros espaciales.

---

#### **Espacio compuesto 1**

Frecuencia del compuesto: 1

#### **Espacio 1**

Longitud: 10 m  
Anchu.: 10 m  
Altu.: 2 m  
Altura de techo: 2 m  
Pared con altura de techo: 2  
Alineación pared 1: Sur  
Mobiliario: normal  
Tipo de uso: Vivienda Unifamiliar Aislada

#### **Suelo**

Construcción: Losa  
Situación montaje: en contacto con terreno

#### **Pared 1**

Construcción del sistema convencional: Pared ext. ladri. macizo (ext)  
Construcción del sistema PCM: Pared ext. ladri. macizo Smartboard 26 activo (ext  
Situación montaje: al aire exterior  
Ventana: existente  
Superficie ventana: 22,5 %  
Factor de sombreado: 0,5  
Tipo ventana: Ventana doble estándar

#### **Pared 2**

Construcción del sistema convencional: Pared ext. ladri. macizo (ext)  
Construcción del sistema PCM: Pared ext. ladri. macizo Smartboard 26 activo (ext  
Situación montaje: al aire exterior  
Ventana: existente  
Superficie ventana: 22,5 %  
Factor de sombreado: 0,5  
Tipo ventana: Ventana doble estándar

#### **Pared 3**

Construcción del sistema convencional: Pared ext. ladri. macizo (ext)  
Construcción del sistema PCM: Pared ext. ladri. macizo Smartboard 26 activo (ext  
Situación montaje: al aire exterior  
Ventana: no disponible

---

**Pared 4**

Construcción del sistema convencional:	Pared ext. ladri. macizo (ext)
Construcción del sistema PCM:	Pared ext. ladri. macizo Smartboard 26 activo (ext
Situación montaje:	al aire exterior
Ventana:	existente
Superficie ventana:	17,5 %
Factor de sombreado:	0,5
Tipo ventana:	Ventana doble estándar

**Tejado**

Construcción del sistema convencional:	Tejado inclinado
Construcción del sistema PCM:	Tejado inclinado Smartboard 26 pasivo
Situación montaje:	al aire exterior
Ventana:	no disponible

**Rentabilidad**

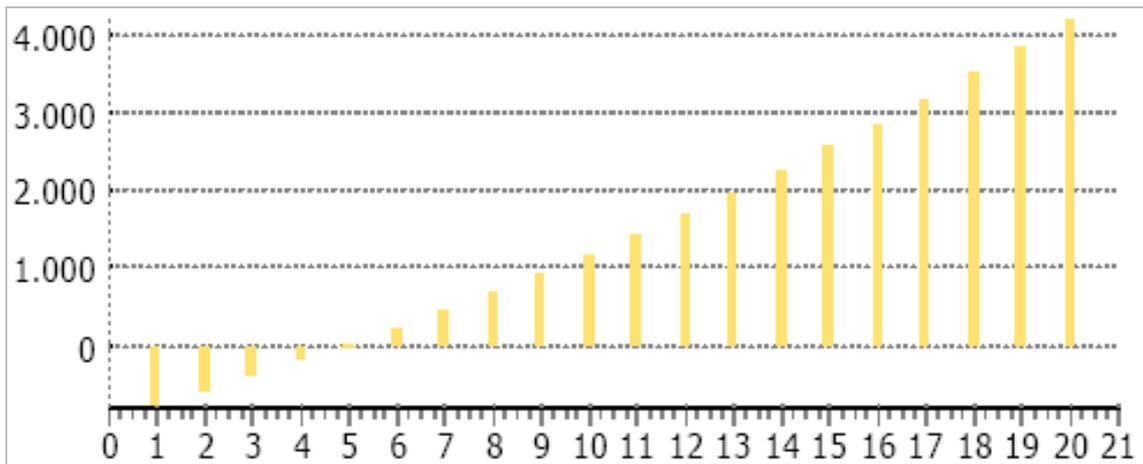
	<b>Sistema PCM</b>	<b>Sistema convencional</b>
<b>Inversiones</b>		
Inversión total:	8000 € (para 20 a)	7000 € (para 20 a)
<b>Costes variables</b>		
Costes calor:	0,12 €/kWh	0,12 €/kWh
Calor necesario determinado:	3577,19 kWh/a	3975,32 kWh/a
Costes frío:	0,12 €/kWh	0,12 €/kWh
Frío necesario determinado:	300,42 kWh/a	458,4 kWh/a
Otros:	0 €	0 €
Costes explotación:	0 % de las inversiones	2 % de las inversiones
<b>Carestía</b>		
Costes calor:	10 %	
Costes frío:	7 %	
Inversiones:	2 %	
Costes explotación:	4 %	
<b>Condi. marginales</b>		
Otros:	2 %	
Interés:	2 %	
Tiempo de observación:	20 a	

**Resultado de la rentabilidad**

Tiempo de amortización	4,5 años
Valor de capital	5157,45 euros
Réditos	33,19 %

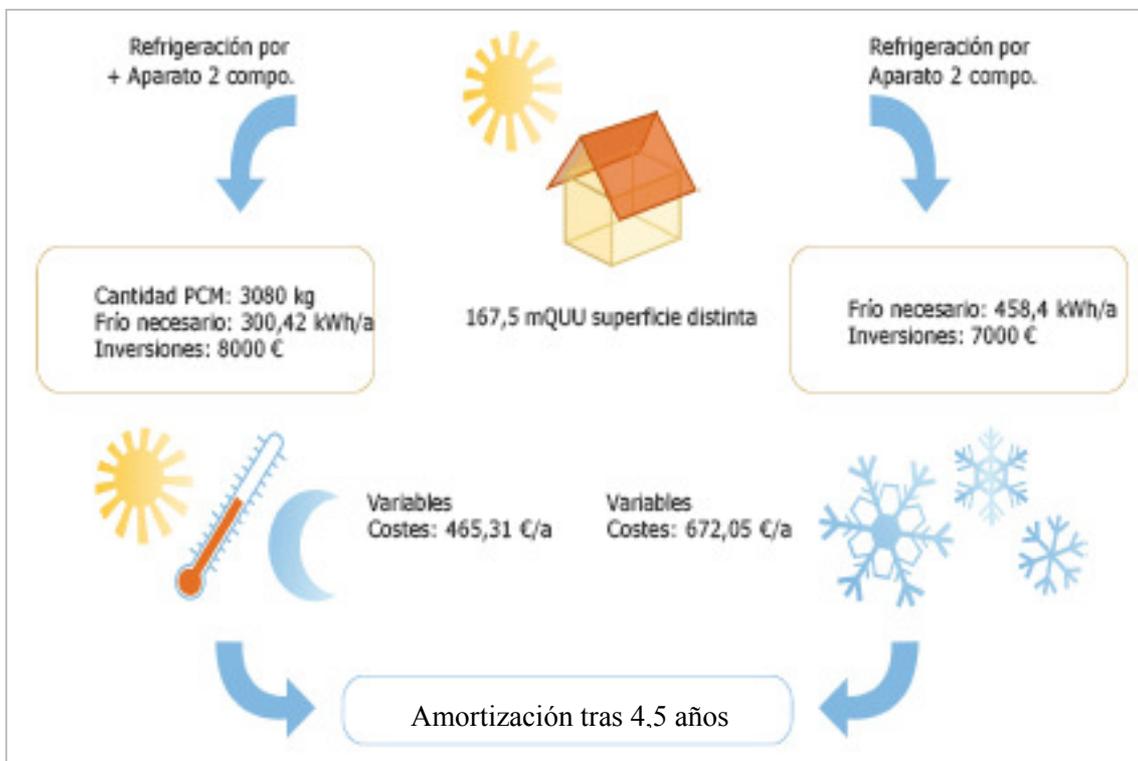
**Tabla 12:** resultados de la rentabilidad de utilizar el sistema Smartboard 26.

### Dinero acumulado (euros & años)



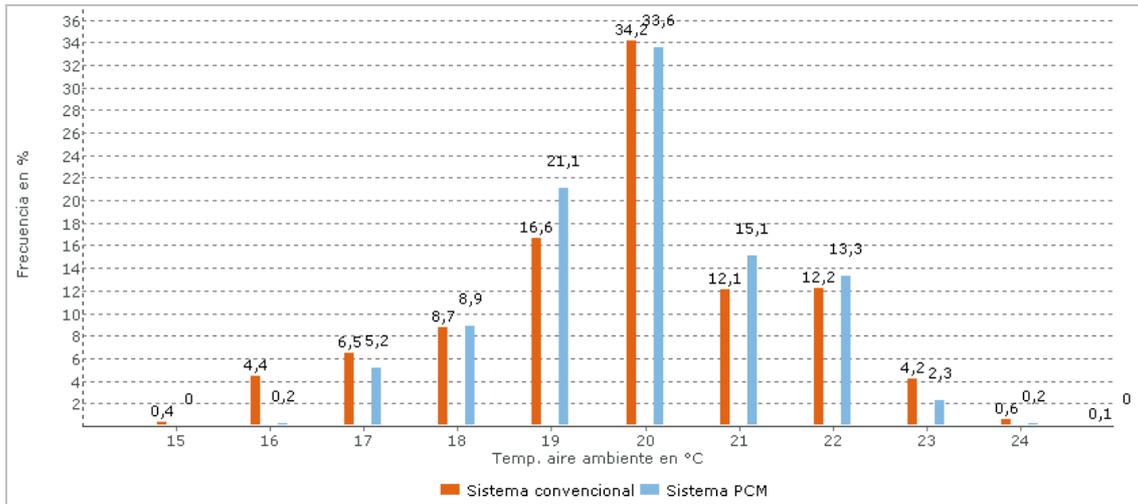
*Figura 78:* dinero acumulado en cada año por el uso del sistema Smartboard 26.

### Representación de la rentabilidad



*Figura 79:* representación de la rentabilidad por el uso del sistema Smartboard 26.

**Datos de las temperaturas ambiente.**



**Temperaturas en el margen de confort (21-26°C)**

Sistema convencional  
29,3% (2.567 h)

Sistema PCM  
30,9% (2.707 h)

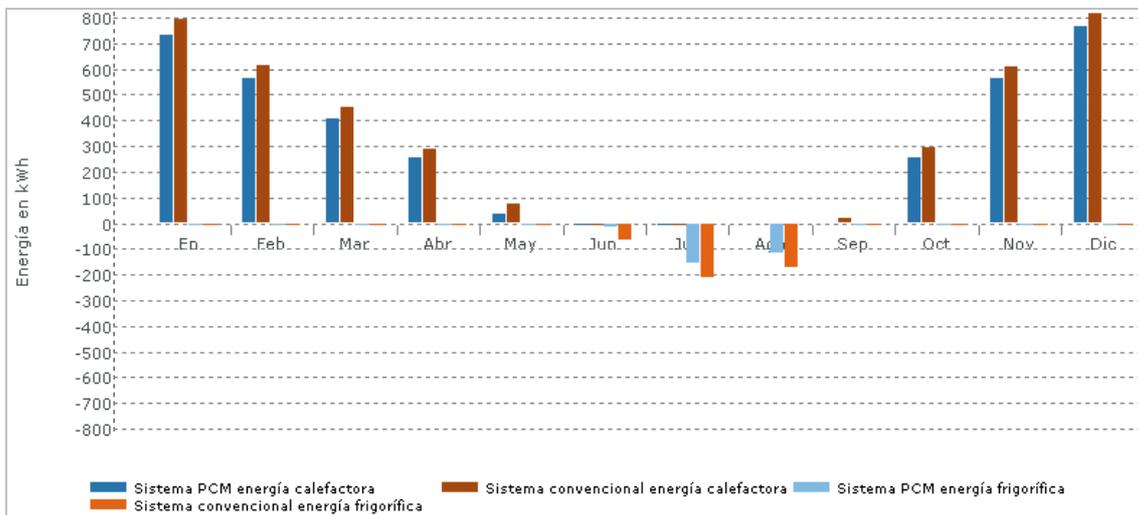
**Temperaturas superiores al margen de confort (>26°C)**

Sistema convencional  
0% (0 h)

Sistema PCM  
0% (0 h)

**Figura 80:** porcentaje de la frecuencia de permanencia de las temperaturas ambientales.

**Datos de los gastos de energía.**



**Valor anual acumulado de energía calorífica**

Sistema convencional  
458,40 kW/h

Sistema PCM  
300,42 kW/h (-34,5%)

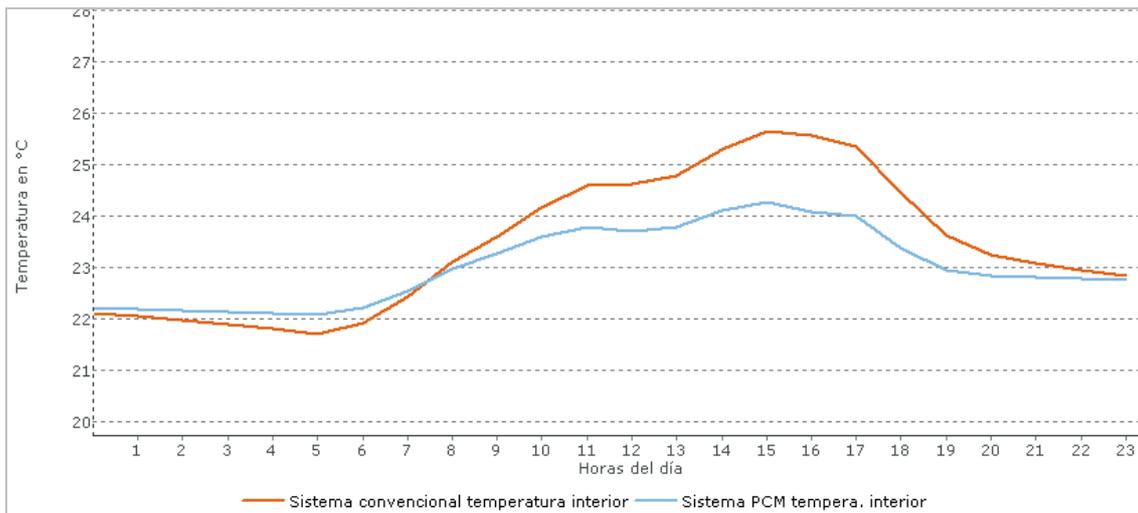
**Valor anual acumulado de energía frigorífica**

Sistema convencional  
3.975,32 kW/h

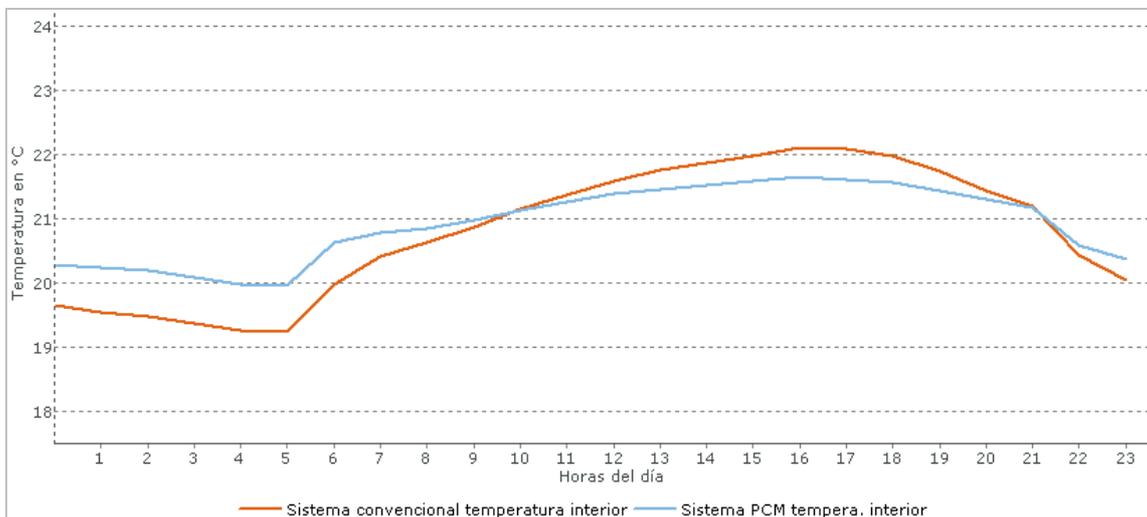
Sistema PCM  
3.577,19 kW/h (-10,0%)

**Figura 81:** valores de los gastos de energía con sistema convencional y sistema PCM.

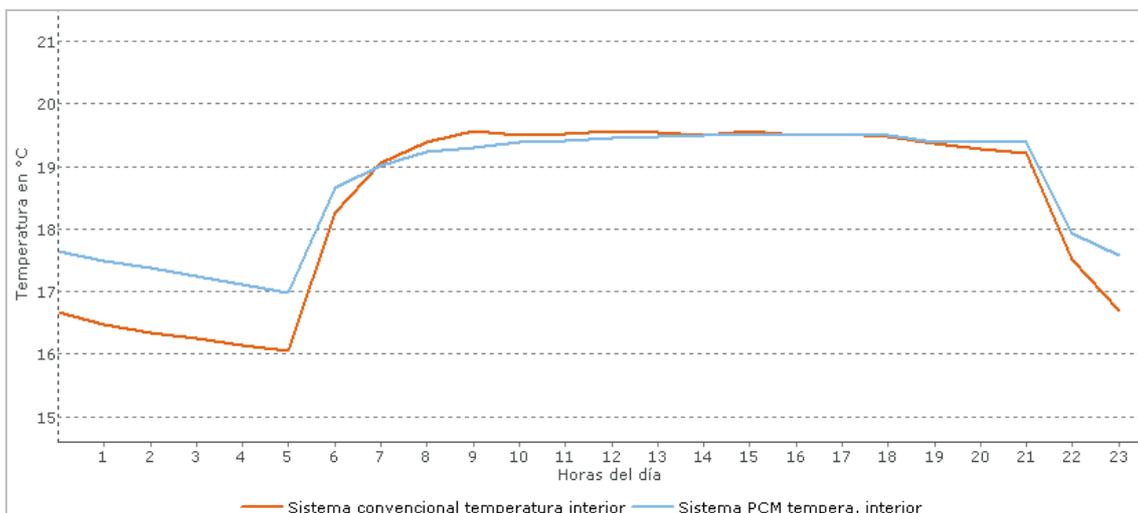
**Datos de las temperaturas en un día.**



**Figura 82:** comparativa de las temperaturas ambientales. Día 3 de septiembre.



**Figura 83:** comparativa de las temperaturas ambientales. Día 15 de agosto.



**Figura 84:** comparativa de las temperaturas ambientales. Día 15 de enero.

**ANEXO VIII: REFERENCIA PROYECTOS DE EDIFICACIÓN QUE INCLUYEN MATERIALES PCM.**

Luwoge casa de bajo consumo,  
Ludwigshafen.



Un nuevo concepto fue desarrollado bajo la coordinación general de Luwoge para la creación de un edificio muy eficiente - no sólo en términos de balance de energía - a partir de componentes innovadores. Yeso con PCM trabajaban en la casa de baja energía, en el año 2001 como parte de la solución del sistema.

La construcción de Badenova,  
Offenburg.



Nuevo edificio de oficinas de la compañía de alimentación Badenova en Offenburg. Como parte de una solución de climatización pasiva, se utilizó yeso con Micronal.

El balance energético del edificio completo fue optimizado por los arquitectos Lehmann en Offenburg y los expertos en energía solar Stahl + Weiss en Friburgo. Los costes de funcionamiento de este edificio son sustancialmente inferiores a los de uno con un sistema convencional de aire acondicionado.

Berlín, proyecto sobre el río Spree



Reurbanización de un complejo residencial y de oficinas situado en el río Spree en Berlín. Expone nuevas e innovadoras soluciones para la optimización de la gestión de la temperatura del edificio. En dos plantas de oficinas, una estera de tubo capilar de refrigeración del techo se combinan con yeso más un material de cambio de fase.

## 2 ANEXO VIII: Referencia proyectos de edificación que incluyen materiales PCM.

Haus de Gegenwart, Munich.



En 2001, la revista SZ invitó a arquitectos de renombre en Alemania y en el extranjero a participar en un concurso de arquitectura. La búsqueda fue en la "Haus der Gegenwart" (Casa de la actualidad). El modelo ganador, por AllmannSattlerWappner, se llevó a cabo, y se inauguró en enero de 2005. Uno de los elementos en el concepto de ventilación pasiva fue el uso de Micronal. Se emplearon más de 1.800kg de material puro de cambio de fase.

Hölderlin Escuela de Gramática, Lauffen am Neckar



En primavera de 2005, 500 m<sup>2</sup> de Micronal SmartBoard fueron empleados en la nueva extensión de Hölderlin Grammar School en Lauffen am Neckar. Las aulas están construidas con tabiques ligeros. Ellos se mantienen a una temperatura agradable incluso en verano, gracias al material de construcción inteligente con su efecto de control de temperatura.

“Sodastrasse 40” proyecto piloto, Ludwigshafen



El "Sodastrasse 40" proyecto piloto en Ludwigshafen es uno de un total de veinte proyectos en toda Alemania con el apoyo de DENA, la agencia alemana de la energía. El proyecto piloto consiste en una remodelación del modelo de eficiencia energética de la vivienda. El objetivo es reducir el consumo de energía en un 85%. Se utilizaron un total de 260 m<sup>2</sup> de Micronal SmartBoard en el techo de la casa adosada.