



**Universidad**  
Zaragoza

## Trabajo Fin de Grado

Evaluación de impacto ambiental mediante análisis  
de ciclo de vida (ACV) de la incorporación de  
materiales de cambio de fase (PCM) en edificación

Autora

**M. Carmen Bistué Garcés**

Directores

Germán Ferreira

Ana María López Sabirón

Ponente

M<sup>a</sup> Peña Ormad Melero

Titulación: Ingeniería Química  
Escuela de Ingeniería y Arquitectura de Zaragoza (EINA)  
2014 / 2015



# *“Evaluación de impacto ambiental mediante análisis de ciclo de vida (ACV) de la incorporación de materiales de cambio de fase (PCM) en edificación”*

## **RESUMEN**

El sector de la construcción contribuye de manera significativa al consumo total de energía y emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera generando un impacto ambiental importante. Una buena parte de este impacto proviene principalmente del sector de la edificación, concretamente en la fase de uso de los edificios debido al consumo de energía procedente de las necesidades de calefacción y refrigeración. Sin embargo, otra de las fases que también contribuyen a dicho impacto es la fabricación y montaje de los materiales que conforman el edificio así como el fin de vida del edificio asociado a la disposición final de estos materiales. Bajo este escenario, con el objetivo de reducir la alta demanda de energía que existe en los edificios, se ha trabajado en las últimas décadas para mejorar la gestión de energía mediante el uso de materiales de cambio de fase (PCM por su siglas en inglés) como un instrumento para el aprovechamiento de las altas temperaturas del día para almacenar energía térmica, y luego las bajas temperaturas de la noche para liberar el calor almacenado. Como consecuencia se tiene la suavización de las fluctuaciones de temperatura así como las diferencias de temperatura entre el aire exterior e interior, obteniéndose como resultado final la reducción de consumo de energía derivado de los sistemas de calefacción/enfriamiento y el confort requerido en el interior del edificio.

No obstante, además de evaluar las potencialidades de estos materiales para ahorrar energía en el sector de la edificación, es necesario conocer también su impacto desde el punto de vista ambiental. En este sentido, el principal objetivo de este trabajo es analizar las implicaciones ambientales de la incorporación de distintos PCM en diferentes soluciones constructivas desde la perspectiva del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) en términos de categorías de impacto ambiental midpoint y valorar si el impacto del ahorro energético alcanzado compensa el impacto asociado a la fabricación y montaje del PCM en la solución constructiva y por lo tanto, verificar si existe un beneficio en términos ambientales de la utilización de esta nueva tecnología.

Para lograr dicho objetivo, se ha realizado un análisis exhaustivo de los PCM y sus diferentes características con la intención de seleccionar los más adecuados para la aplicación concreta. En la selección se ha tenido en cuenta la vida útil de los PCM, partiendo del supuesto de que los PCM pueden sufrir degradación y dejar de conservar las propiedades térmicas favorables para la respectiva aplicación. En el caso de que el material seleccionado tenga menor vida útil que el edificio, será necesario tomarlo en cuenta en el análisis de ciclo de vida del sistema.

El trabajo se desarrolla en tres etapas. La primera es una revisión del estado del arte de los materiales de cambio de fase, su comportamiento de operación y su aplicación en la edificación, así como su evaluación mediante el ACV. En este punto se establecen las bases para la selección de los PCM adecuados en base a criterios de temperatura óptima de confort térmico en un edificio, la vida útil del material y que se hayan realizado pruebas experimentales que aseguren que el material es adecuado para la incorporación en diferentes soluciones constructivas. Posteriormente se define el sistema formado por el cerramiento y PCM, sobre el cual se va a realizar el estudio, desarrollando un Inventario de Ciclo de Vida (ICV) detallado con la caracterización de entradas y salidas de materia y energía. Por último se desarrolla una Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) de la incorporación de los cuatro PCM seleccionados en tres soluciones constructivas mediante la herramienta informática SIMAPRO, se analizan e interpretan los resultados obtenidos y se extraen las conclusiones más relevantes. Finalmente se encuentran los Anexos con amplia información detallada de los trabajos previos, caracterización e identificación de los sistemas analizados y un análisis desarrollado del impacto ambiental de cada caso de estudio.



DECLARACIÓN DE  
AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

D./D<sup>a</sup>. MARIA CARMEN BISTUÉ GARCÉS

con nº de DNI 18036805K en aplicación de lo dispuesto en el art.

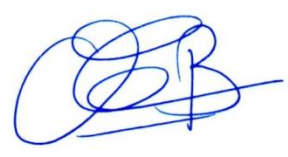
14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster) \_\_\_\_\_, (Título del Trabajo)

Evaluación de impacto ambiental mediante análisis de ciclo de vida (ACV) de la incorporación de materiales de cambio de fase (PCM) en edificación

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Zaragoza, 20 de Noviembre de 2015



Fdo: María Carmen Bistué Garcés



## Tabla de contenido

1. Introducción y motivación del estudio .....	9
2. Objetivos .....	11
3. Resumen del Estado del Arte y revisión teórica.....	12
3.1. Materiales de Cambio de Fase (PCM) .....	12
3.1.1. Almacenamiento de energía térmica .....	12
3.1.2. Propiedades de los PCM .....	12
3.1.3. Clasificación de los PCM.....	13
3.1.4. Aplicaciones de los PCM .....	13
3.1.5. Degradación de los PCM y determinación de su vida útil .....	14
Mecanismos de degradación del PCM .....	14
Determinación de la vida útil del PCM .....	18
3.2. PCM en la edificación.....	18
3.2.1. Incorporación de PCM en materiales constructivos.....	19
4. Metodología .....	20
5. Definición del sistema de estudio.....	22
5.1. Selección de PCM para la aplicación .....	22
5.2. Determinación de la vida útil del PCM .....	24
5.3. Descripción del sistema .....	25
5.4. Unidad funcional y temporal del estudio .....	28
6. Inventario de ciclo de vida (ICV) del sistema .....	29
7. Evaluación de impacto ambiental del sistema.....	31
7.1. El consumo de energía en los casos de estudio .....	31
7.2. Impacto ambiental para los diferentes casos de estudio .....	33
8. Conclusiones.....	39
9. Futuras perspectivas.....	40
10. Bibliografía.....	41
Índice de figuras .....	45
Índice de tablas.....	45
Abreviaturas .....	46
Nomenclatura.....	46

---

## Tabla de contenido de Anexos

Índice de figuras de Anexos .....	48
Índice de tablas de Anexos .....	49
ANEXO A: Materiales de Cambio de Fase (PCM) .....	50
Almacenamiento de energía térmica .....	50
Clasificación de los PCM .....	52
Propiedades según clasificación. Ventajas desventajas .....	56
Degradación de PCM a partir de trabajos experimentales.....	57
Estabilidad del material .....	58
Vida útil de los PCM .....	66
PCM en la edificación .....	67
Incorporación de PCM en materiales constructivos.....	68
ANEXO B: Definición del sistema objeto de estudio .....	72
Trabajos experimentales en distintos elementos constructivos .....	72
ANEXO C: Análisis de resultados .....	79
Inventario de ciclo de vida .....	79
Impacto ambiental mediante LCA para los diferentes casos de estudio .....	87



## 1. Introducción y motivación del estudio

Durante el último siglo las actividades humanas han comenzado a incidir fuertemente en el ecosistema terrestre. El progreso de la ciencia y la tecnología han permitido una calidad de vida y unos sistemas de producción que han originado un incremento del consumo de energía mundial, principalmente en los países industrializados y economías emergentes. Este aumento del consumo de energía tiene efectos nocivos sobre el medio ambiente como el crecimiento de emisiones de gases a la atmósfera entre otros. Este es un problema globalizado puesto que todos los países sufren las consecuencias. Por tanto, los países desarrollados promueven cada vez con mayor eficacia nuevas políticas energéticas e impulsan dos tipos de acciones para reducir las emisiones: el aumento de la participación de las energías renovables y la promoción de medidas de ahorro y eficiencia energética. Entre las medidas de eficiencia energética surge, con más interés entre los investigadores, una técnica para aprovechar la energía solar mediante la aplicación de materiales de cambio de fase (PCM, según sus siglas en inglés, Phase Change Materials). Esta tecnología está en fase de investigación y desarrollo actualmente debido a que existen numerosos aspectos a mejorar hasta la aplicación a gran escala de estos materiales [1].

En concreto, el sector de la construcción contribuye considerablemente al consumo total de energía y emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera. Se estima este valor alrededor del 40% en Europa. Dentro del sector de la construcción, es en los edificios comerciales y en las viviendas donde mayor demanda de energía existe [2]. En estas construcciones se produce un elevado consumo de energía y de emisiones directas o indirectas de CO<sub>2</sub> a la atmósfera debido principalmente a las necesidades de calefacción y refrigeración. Este es un problema que ha originado numerosas investigaciones en todo el mundo para lograr construir edificios de bajo consumo energético [3], donde se utilice la energía de manera eficiente. Con el objetivo de reducir la alta demanda de energía que existe en estos edificios, se ha trabajado para mejorar el aislamiento térmico en las construcciones o mejorar la gestión de energía. En particular, se ha investigado ampliamente en las últimas décadas [1, 2, 4-6], la utilización de PCM como instrumento para el almacenamiento de energía térmica con el objetivo de suavizar las fluctuaciones de temperatura y las diferencias de temperatura entre el aire exterior e interior, aprovechando las altas temperaturas del día y las bajas de la noche para mejorar la calidad del aire y el confort térmico y reducir con ello el consumo de energía derivado de los sistemas de calefacción y enfriamiento.

El almacenamiento de energía puede ser implementado por el calor sensible, mediante el aumento y disminución de la temperatura de los revestimientos de los edificios, o por el calor latente, con la inclusión de PCM para aumentar la densidad de energía térmica. La ventaja principal de almacenamiento de calor latente (LHS, según sus siglas en inglés, Latent Heat Storage) es la alta densidad de almacenamiento para temperatura cuasi-constante. Este LHS puede ser utilizado en edificación para la calefacción y para la refrigeración de edificios mediante sistemas pasivos que incorporan PCM en los elementos estructurales o también en sistemas activos [4].

Por tanto, la aplicación de PCM como sistemas de almacenamiento de energía térmica (TES, según sus siglas en inglés, Thermal Energy Storage) es una manera efectiva para la conservación de energía y en consecuencia reducir las emisiones de los gases de efecto invernadero (GEI). Según un estudio realizado por Anisur y col. en 2013 [1], alrededor de 3,43% de las emisiones de CO<sub>2</sub> para el año 2020 podría reducirse mediante la aplicación de PCM en la construcción y en los sistemas de energía solar térmica. Además del beneficio ambiental, también contribuye al confort térmico en numerosas aplicaciones. Es por ello que los TES con PCM se perciben como un potencial candidato para atenuar este problema [1].

Aunque utilizar materiales que favorecen la reducción del consumo de energía en los edificios contribuye directamente a disminuir el impacto ambiental en su fase operativa, es necesario tener en cuenta que el empleo de nuevos materiales e incluso nuevos procesos productivos para la fabricación de estos materiales puede conducir a mayores consumos de energía y materiales durante las fases de fabricación, construcción y demolición de los edificios.

Para valorar estos aspectos, este proyecto incluye un estudio ambiental basado en las categorías de impacto midpoint utilizando la metodología de Análisis del Ciclo de Vida (ACV) del uso de PCM aplicados en la construcción de edificios. El ACV es una metodología empleada para cuantificar y evaluar el impacto ambiental de un producto, servicio u organización a través de todas las fases de su ciclo de vida. Para realizar un correcto análisis es necesario tener en cuenta aspectos medioambientales como los impactos asociados a los procesos productivos, construcción, desmantelamiento y mantenimiento del edificio, incluyendo los efectos en la calidad del ecosistema o el uso de los recursos fósiles disponibles [3]. En este sentido, para la realización del proyecto ha sido necesaria la definición del sistema objeto de estudio detallando las entradas y salidas de materiales y energía correspondientes para conformar adecuadamente el inventario del ciclo de vida (ICV) asociado.

Por tanto, en el presente trabajo fin de grado se pretende profundizar en el conocimiento de los PCM y su aplicación concreta para la edificación, evaluando por una parte el rendimiento térmico de la aplicación de estos materiales durante su fase de uso y por otra analizando mediante una metodología integral como el ACV el impacto ambiental que tiene su aplicación en la vida total del edificio.

## 2. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo fin de grado es analizar si es rentable desde un punto de vista ambiental la incorporación de PCM en sistemas constructivos, es decir, si efectos ocasionados por los ahorros de energía obtenidos durante la fase de uso son lo suficientemente significativos como para compensar el impacto ambiental originado por la incorporación del PCM a lo largo de la vida útil del edificio.

Para poder alcanzar este objetivo general, el proyecto además aborda varios objetivos específicos:

- Profundizar en el conocimiento de los PCM y sus propiedades para seleccionar aquellos que pueden ser aplicables.
- Definir el sistema formado por un cerramiento convencional y el PCM, sobre el cual se va a realizar el análisis.
- Analizar el comportamiento de operación de los PCM seleccionados para el proyecto, con el fin de establecer las bases adecuadas para la estimación de la vida útil del material y los ahorros energéticos en climatización que conllevará su incorporación en edificios.
- Desarrollar un ICV detallado para el sistema definido en el primer objetivo considerando el objetivo anterior.
- Validar el comportamiento obtenido con estudios previos.
- Analizar las implicaciones ambientales de la incorporación de un PCM en el sector de la edificación desde la perspectiva del ACV en términos de categorías de impacto ambiental midpoint.

### 3. Resumen del Estado del Arte y revisión teórica

En este apartado se pretende realizar una exhaustiva revisión de la literatura existente sobre los PCM, sus principales características y variables de operación así como las numerosas aplicaciones en diferentes sectores.

#### 3.1. Materiales de Cambio de Fase (PCM)

Un PCM es una sustancia capaz de almacenar y liberar energía del medio que le rodea manteniendo la temperatura constante durante la transferencia de calor. Este intercambio de energía se denomina calor latente de un material y se produce durante el cambio de fase del mismo. El interés de estos materiales es que durante el cambio de fase, la temperatura se mantiene prácticamente constante mientras el material absorbe o libera energía, durante la etapa de fusión o solidificación del material. Esto supone una mayor densidad energética en este proceso respecto a un intercambio por calor sensible.

##### 3.1.1. Almacenamiento de energía térmica

Mayoritariamente, centran la atención en las investigaciones actuales tres posibilidades de almacenamiento de energía [7], las cuales se desarrollan en mayor detalle en el Anexo A:

- Por calor sensible, es decir, por aumento o descenso de la temperatura del material acumulador.
- Por calor latente, aprovechando la entalpía asociada a un cambio de fase.
- Por reacción termoquímica aprovechando el calor puesto en juego en la reacción.

En este sentido, y como ya se ha comentado, los PCM pertenecen a los sistemas de LHS, pudiendo considerarse tres cambios de fase, sólido-líquido, líquido-gas y sólido-sólido, siendo el sólido-líquido el de mayor aplicabilidad por sus características.

##### 3.1.2. Propiedades de los PCM

Según la información recopilada de diferentes autores [5, 8-10], las propiedades más relevantes que definen un PCM son:

- Propiedades termofísicas
  - Temperatura de fusión ( $T_f$ ) en el rango de funcionamiento según la aplicación.
  - Alto calor latente de fusión ( $\Delta H_f$ ) por unidad de volumen.
  - Alto calor específico para proporcionar calor sensible adicional significativo.
  - Alta conductividad térmica en fase sólida y líquida (buena transferencia de calor).
  - Baja variación de volumen en el cambio de fase y baja presión de vapor a la temperatura de funcionamiento.
  - Fusión congruente del material de cambio de fase con cada ciclo de solidificación/fusión, con el mínimo subenfriamiento.
  - Cambio de fase reproducible.
  - Alta densidad.
- Nucleación y crecimiento de los cristales
  - Tasa de nucleación alta para evitar el subenfriamiento de la fase líquida durante la solidificación y para asegurar que el proceso de fusión y solidificación se produce a la misma temperatura.
  - Alta tasa de crecimiento de cristales, para que el sistema pueda satisfacer la demanda de recuperación de calor del sistema de almacenamiento.

- Propiedades químicas
  - Ciclo de solidificación/fusión reversible y completo.
  - Baja degradación después de un elevado número de ciclos de fusión/solidificación.
  - No corrosivo para los materiales encapsulados.
  - No tóxico, no inflamable y no explosivo.
- Económicas
  - Abundante y disponible.
  - Rentable.
  - Fácil reciclaje y tratamiento.
  - Buen comportamiento ambiental basado en ACV.

### 3.1.3. Clasificación de los PCM

Durante las últimas décadas, se han identificado y estudiado ampliamente numerosos PCM, con una enorme gama de puntos de fusión-solidificación. Estos materiales incluyen orgánicos (parafinas, ácidos grasos,...), inorgánicos (hidratos de sales, metales,...) y eutécticos (mezcla de orgánicos y/o materiales inorgánicos). Una posible clasificación de los PCM para la transformación de fase sólido-líquido según algunos autores [6, 9] se presenta en la Figura 1.

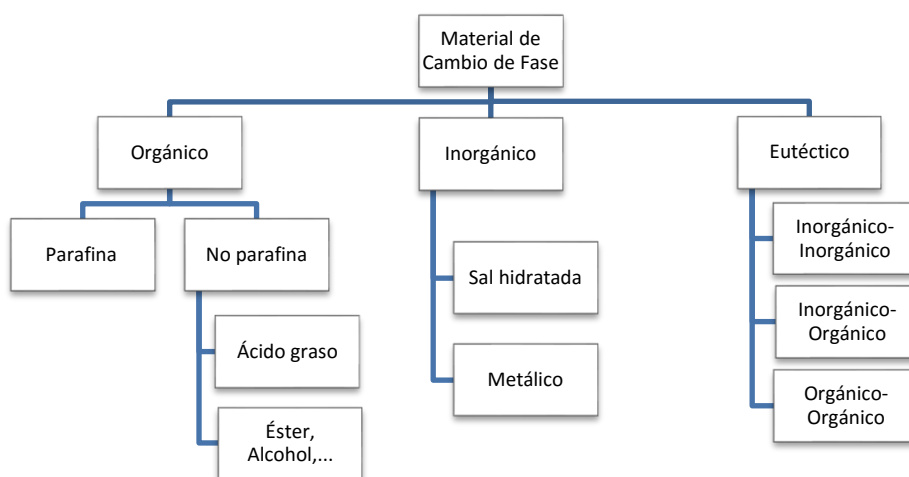


Figura 1: Clasificación de los PCM [9]

En el Anexo A se describen detalladamente los diferentes PCM según la anterior clasificación tomando en cuenta las diferentes características/propiedades (tales como vida útil, estabilidad/degradación, etc.), lo cual permite seleccionar con mejor criterio técnico un determinado PCM según su aplicación.

### 3.1.4. Aplicaciones de los PCM

La trayectoria de los PCM desde su inicio, en la década de los 40, hasta hoy en día, ha sido estudiada por Rathod en 2013 [6] quien realiza un resumen completo. La investigación de estos materiales no recibió mucha atención hasta la crisis energética de la década de 1970 y principios de 1980, cuando fue ampliamente estudiado para su uso en diferentes aplicaciones, especialmente para la calefacción solar. Aunque la investigación sobre el LHS para instalaciones solares sigue desarrollándose, por otro lado, se está realizando un enorme trabajo para explorar el uso de los PCM en otras aplicaciones, en concreto, en aplicaciones de aire acondicionado, sistemas de calefacción por suelo radiante, en la edificación, en sistemas de refrigeración, electrónica de refrigeración, la recuperación de calor residual, en la industria textil, conservación de alimentos en la industria alimentaria, para transporte de mercancías sensibles a los cambios de temperaturas, por nombrar algunas de las aplicaciones más estudiadas ya que son numerosas [6, 11].

Dentro del sector de la edificación, también se han realizado numerosos estudios sobre los PCM para diferentes aplicaciones. El uso de PCM como sistemas TES en edificios fue una de las primeras aplicaciones estudiadas. Algunos de los primeros artículos publicados en la bibliografía [9] se ocupaban del uso de PCM para calefacción y refrigeración en los edificios. En concreto para su uso como parte de componentes estructurales para almacenamiento térmico. En la década de los 90 se investigó sobre la reacción al fuego de los PCM y los aditivos ignífugos que mejoran la respuesta al fuego de los materiales [12].

Una de las aplicaciones de PCM más interesante para edificios es lograr suavizar las variaciones de temperatura y reducir con ello la demanda de calefacción y refrigeración. Concepto conocido como enfriamiento libre desarrollado por diferentes autores [7], el cual consiste en la refrigeración del ambiente en edificios mediante el uso de PCM, donde se aprovecha el frío durante la noche para reducir la temperatura en las horas más calurosas del día.

Algunos autores [13, 14] han experimentado sobre la impregnación de los PCM en materiales de construcción porosos, como por ejemplo placas de yeso para mejorar el confort térmico. Otra aplicación de los PCM en los edificios, es la refrigeración termoelectrica integrando un material de cambio de fase en el diodo térmico para mejorar la eficacia del disipador de calor. Otra área en estudio actualmente es el aprovechamiento de la gran superficie de acristalamiento en numerosos edificios para la utilización de PCM en ellos, utilizando una ventana con doble acristalamiento con una cortina de PCM entre ambos cristales [7].

En resumen, hasta el momento las investigaciones realizadas para diferentes aplicaciones han sido numerosas, donde se puede observar la gran variedad de campos en los que los PCM pueden competir para la reducción del consumo de energía.

#### 3.1.5. Degradación de los PCM y determinación de su vida útil

##### Mecanismos de degradación del PCM

Un PCM es fiable, si es térmicamente, químicamente y físicamente estable después de un número de ciclos térmicos repetidos. Sin embargo, debido a las características inherentes de estos materiales, los PCM pueden degradarse con el tiempo de diferentes formas y esta degradación de las propiedades termofísicas no son en general deseables [15]. Algunos de los experimentos realizados sobre los PCM que albergan conclusiones significativas sobre degradación se detallan en el Anexo A.

Entre los criterios más importantes que han limitado el uso generalizado de los PCM como sistemas LHS está la vida útil de los sistemas PCM-contenedor. La inestabilidad de los PCM a largo plazo se considera, según [4], debida a dos factores: la baja estabilidad de las propiedades físicas y térmicas de los materiales y/o la corrosión entre el PCM y el contenedor [4, 7].

Se puede considerar la degradación de los PCM debida a varios factores.

- Inestabilidad del propio material
  - Pérdida de las propiedades termofísicas:
    - temperatura de cambio de fase: variación de la temperatura de cambio de fase con el aumento del número de ciclos de fusión-solidificación.
    - entalpía de cambio de fase: desviación de la entalpía de cambio de fase con el aumento del número de ciclos de fusión-solidificación.
    - disminución de la densidad del PCM: pérdida de masa del PCM o pérdida de agua en sales hidratadas durante el cambio de fase.
  - Degradación al someter al PCM a temperatura elevada: la temperatura elevada origina en algunos materiales una pérdida de masa considerable.

- Subenfriamiento: el material comienza a solidificar por debajo de la temperatura esperada (o sobreenfriamiento el material funde por encima de la temperatura esperada).
- Separación de fases: el material no realiza el cambio de fase completamente sino que alguna parte permanece en estado sólido.
- Pérdida de las propiedades químicas: por ejemplo oxidación en contacto con el aire.
- Corrosión por contacto del PCM con el material contenedor.

Posibles soluciones o disminución de los efectos anteriores pueden ser:

- Agentes nucleantes
- Espesantes
- Encapsulación

#### *Estabilidad del material*

Existen estudios que incluyen numerosos experimentos de estabilidad térmica de los PCM [5-7, 16]. En el Anexo A se presenta una relación de un gran número de ellos indicando el material, sus propiedades térmicas, el número de ciclos ensayados, si ha habido algún tipo de degradación durante el transcurso del estudio y la referencia del autor para la posterior selección del PCM según la aplicación final.

A continuación se realiza un resumen de las propiedades térmicas y la posible degradación según la clasificación de PCM realizada en el apartado 3.1.3 y las Tablas A3-A7 del Anexo A.

#### *Compuestos orgánicos*

La mayoría de los PCM orgánicos son no corrosivos y químicamente estables, muestran poco o ningún subenfriamiento, son compatibles con la mayoría de los materiales de construcción y tienen un alto calor latente por unidad de peso y baja presión de vapor. Sus desventajas son la baja conductividad térmica, altos cambios en el volumen de cambio de fase y la inflamabilidad [5].

#### *Orgánicos parafínicos*

Las parafinas normales de tipo  $C_nH_{2n+2}$  son la familia de hidrocarburos saturados con propiedades similares. Hidrocarburos de cadena lineal con temperaturas de fusión que oscilan entre los 23 y 67°C. Cuanto mayor sea el valor de n, mayor es la temperatura de fusión y el calor latente de fusión.

Las ceras de parafina son los compuestos orgánicos más utilizados comercialmente como PCM. Son en general aptas para su uso como PCM debido a su alto calor de fusión, temperaturas variadas de cambio de fase, el escaso sobreenfriamiento y el comportamiento químicamente inerte y estable. Estos PCM son inocuos y no tóxicos. Además están disponibles en el mercado a un coste razonable por lo que las parafinas son ampliamente utilizadas por muchos fabricantes [6]. Proporcionan una estabilidad térmica adecuada según los experimentos observados en la lista de parafinas mostradas en la Tabla A3 del Anexo A. Se observa que las parafinas más estudiadas tienen principalmente temperaturas de fusión en el intervalo de 45°C a 60°C. Estas parafinas se ensayaron de forma general para determinar la estabilidad térmica hasta 10000 ciclos térmicos. Aunque se debería tener en cuenta la estructura química y el análisis molecular antes y después de realizar los estudios de ciclo de vida, ya que es muy difícil obtener conclusiones sobre estabilidad térmica sin conocer exactamente la composición de las parafinas (ceras comerciales) [6].

#### *Orgánicos no parafínicos*

Los compuestos no parafínicos son los PCM más abundantes con muy diferentes propiedades. Estos materiales orgánicos tienen más subgrupos de ácidos grasos y otros compuestos orgánicos como ésteres, alcoholes, etc. Sin embargo, los ácidos grasos son los PCM más prometedores dentro de este grupo debido a su disponibilidad a adecuadas temperaturas de cambio de fase y alto calor de fusión. Los ácidos grasos son fáciles de producir a partir de aceites vegetales y animales comunes.

La Tabla A4 del Anexo A proporciona una lista de los PCM no parafínicos investigados por diferentes autores junto con su punto de fusión y el calor latente. Las no parafinas más estudiadas son el ácido palmítico, mirístico, ácido esteárico y ácido láurico, aunque para aplicaciones en la edificación los más adecuados son el ácido cáprico, metil palmitato y metil estearato de los que no hay gran cantidad de estudios realizados para el cálculo de la vida útil de los materiales [17].

Con el fin de comprobar la estabilidad térmica de tales PCM, diferentes investigadores han desarrollado distintas pruebas de ciclos térmicos en estos materiales y se deduce de estos experimentos que los PCM no parafínicos que mejor soportan el sometimiento a ciclos térmicos son los ácidos grasos y por tanto su vida útil es mayor respecto al resto de compuestos del grupo. En cuanto a la corrosión con metales, se concluye que soportan mejor la corrosión ante metales como aluminio y acero inoxidable que acero al carbono o cobre [18].

#### Compuestos inorgánicos

Los PCM basados en compuestos inorgánicos tienen un alto calor latente por unidad de volumen y alta conductividad térmica y no son inflamables y de bajo costo en comparación con los compuestos orgánicos. Sin embargo, son corrosivos para la mayoría de los metales y sufren descomposición y subenfriamiento, que puede afectar a sus propiedades de cambio de fase. En general, las aplicaciones de los PCM inorgánicos requieren el uso de agentes de nucleación y espesantes para minimizar el subenfriamiento y segregación de fases [5].

#### *Inorgánicos, sales hidratadas*

Las sales hidratadas son atractivas para aplicaciones de almacenamiento de calor debido a su bajo coste y fácil disponibilidad. Tienen un punto de fusión definido y una mayor conductividad térmica que otros compuestos. Sin embargo, dos formas importantes de degradación de estos materiales son la separación de fases y el sobreenfriamiento. Durante la fusión de los hidratos de sal, se forman otros hidratos o sales deshidratadas. Estos tienden a depositarse y reducir el volumen activo disponible del material. Este problema de la separación de fases se puede eliminar en cierta medida mediante el uso de mezclas espesantes, como el gel de sílice o la poliacrilamida. Este proceso, sin embargo influye en las características de almacenamiento de calor de la mezcla y el PCM se degrada con el tiempo. Otro problema importante de las sales hidratadas es el sobreenfriamiento, es decir, la mezcla empieza a cristalizar en un punto de solidificación diferente al especificado. Esto también se puede evitar mediante el uso de agentes de nucleación adecuados para iniciar el desarrollo de los cristales en punto deseado según la aplicación.

La Tabla A5 del Anexo A, proporciona una lista de sales hidratadas junto con su punto de fusión y el calor latente de fusión. Se puede observar que el cloruro de calcio hexahidratado es el PCM más estudiado para el intervalo de fusión de 20-30°C. La tabla compara el calor latente de fusión por unidad de masa de varios PCM orgánicos e inorgánicos sometidos a un cambio de fase dentro del rango de temperatura de 0 a 120°C. Se deduce que casi todos los PCM que fueron sometidos al ensayo de ciclos térmicos están en el rango de 20-60°C, excepto acetamida, acetanilida, triclorofluorometano heptadecahidrato y  $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ . Los PCM basados en sales hidratadas más estudiados están en el rango de 30-60°C. Esto puede ser debido a que los PCM, que pueden ser utilizados para aplicaciones de bajas temperaturas como el calentamiento de agua, cocción y secado deben tener una temperatura de fusión en ese rango. Además, se puede señalar que los PCM tienen calor latente de fusión en el intervalo de 120-225 kJ/kg [6].

#### *Metales*

Este grupo de materiales incluye metales puros y aleaciones. Los compuestos metálicos no se suelen considerar en la tecnología PCM debido al inconveniente del peso. Sin embargo, cuando la densidad es importante, son posibles candidatos debido al alto calor de fusión por unidad de volumen que presentan, y



las altas conductividades. El único metal del que se ha encontrado estudios sobre la estabilidad térmica es una aleación de Al, Mg y Zn que se muestra en la Tabla A6 del Anexo A.

#### *Degradación debido a altas temperaturas (por encima del punto de fusión)*

Determinados materiales como las parafinas se degradan al someterlas a elevadas temperaturas, muy por encima de su punto de fusión. Las altas temperaturas originan una pérdida de masa considerable que puede ser evitada mediante la encapsulación del PCM [19].

#### *Segregación de fases*

La alta densidad de almacenamiento de los PCM de sales hidratadas es difícil de mantener y generalmente disminuye con el número de ciclos térmicos. Esto es porque la mayoría de las sales hidratadas se funden congruentemente con la formación de la sal hidratada inferior, haciendo el proceso irreversible y conduce a la continua disminución de su eficiencia de almacenamiento [5].

A pesar de los problemas asociados con la aplicación de sales hidratadas en sistemas de almacenamiento térmico, un número de fabricantes han puesto esfuerzos significativos en el desarrollo de agentes de nucleación y estabilizantes para algunas de las sales hidratadas. Hay por lo menos dos empresas de renombre que han desarrollado los PCM comerciales encapsulados en esferas de plástico. Los productos han sido probados para un gran número de ciclos y se determinó su estabilidad. Por ejemplo, el calor latente obtenido para el PCM comercial cloruro de calcio hexahidratado ( $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) es  $267 \text{ MJ/m}^3$ , es menor que el de la sal pura debido al agua extra, la nucleación y los agentes espesantes utilizados. El cloruro de calcio, a pesar de que su calor latente es más bajo que otras sales hidratadas, muestra la segregación de fases mínima, probablemente debido a que es más fácil de estabilizar [5].

#### *Subenfriamiento*

El subenfriamiento es otro grave problema asociado con todas las sales hidratadas [5].

Ryu y col. [20] han realizado un extenso estudio sobre espesantes y agentes de nucleación, que puede ser utilizado para un gran número de sales hidratadas. La aplicación de agentes de nucleación y espesantes adecuados adicionales al PCM, muestra una reducción significativa en el grado de subenfriamiento [5].

Zhang y col. [21] consiguieron disminuir el sobreenfriamiento del n-hexadecano en un 43% con la adición de 0.1% en peso de nanotubos de carbono de pared múltiple.

#### *La corrosión entre el PCM y el contenedor*

Se conocen varios medios de incorporación de los PCM. Los métodos más prometedores son: incorporación directa, inmersión y encapsulación. Además, el PCM también se puede utilizar en forma de un único tablero laminado y se combina con otros componentes como envoltura [9].

La encapsulación de los PCM ha desarrollado interés en varios investigadores. Se han realizado estudios en distintos aspectos como la resistencia a la corrosión de metales en contacto con sales hidratadas fundidas, o las ventajas y desventajas de las diferentes geometrías de encapsulación de PCM y su compatibilidad.

Sari y Kaygusuz [18] también estudiaron la resistencia a la corrosión de algunos materiales de construcción para los ácidos grasos para un largo período de exposición. Los materiales de contención ensayados fueron el acero inoxidable (SS304L), acero al carbono (acero C20), aluminio (Al) y el cobre (Cu). A partir de los resultados de las pruebas de corrosión gravimétricas y metalográficas, se puede concluir que el acero inoxidable (SS304L) con una capa superficial de óxido de cromo ( $\text{Cr}_2\text{O}$ ) y el aluminio (Al) con una capa superficial de óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) son compatibles con los ácidos grasos investigados.

H. Fellchenfeld y col. [22] estudiaron, usando el microscopio electrónico de barrido (SEM) después de 500 ciclos, la compatibilidad de los PCM con contenedores de materiales como el aluminio y el acero

inoxidable. Una muestra de aluminio en contacto con acetanilida no mostró casi ninguna corrosión. Por otro lado, las muestras de acero inoxidable presentaron muy fuerte corrosión en contacto con acetanilida.

#### Determinación de la vida útil del PCM

El tiempo de vida útil de un PCM viene determinado por la cantidad de ciclos térmicos que es capaz de soportar un material manteniendo su estabilidad térmica. El PCM es sometido a repetidos ciclos de calentamiento y enfriamiento en los que el material cambia de fase de sólido a líquido y posteriormente vuelve a cambiar de fase de líquido a sólido. Se miden sus propiedades térmicas ( $T_f$  y  $\Delta H_f$ ) y se obtiene el número de ciclos en los que las propiedades térmicas del material no varían de forma considerable, es decir la vida útil del PCM.

Tras realizar una exhaustiva búsqueda, existe muy poca bibliografía acerca de la degradación térmica de los PCM y la determinación de su tiempo de uso, especialmente en aplicaciones para edificios donde la vida útil del material debe ser elevada.

Aunque es complicado conocer la vida útil real de estos materiales y en qué momento dejan de conservar sus propiedades adecuadas para las aplicaciones a las que se destina, existen algunos artículos basados en experimentos realizados en laboratorios de materiales sometidos a ciclos térmicos acelerados, para determinar si en un número concreto de ciclos, el material mantiene sus propiedades térmicas intactas ( $T_f$  y  $\Delta H_f$ ). Algunos materiales son sometidos a 50, 100, 1000 o hasta 5000 ciclos térmicos. Pero el problema es determinar si ese máximo de 5000 ciclos es suficiente para asegurar que un material, por ejemplo aplicado a la edificación, dentro de 10 años seguirá cumpliendo la función para la que fue creado. Hasta el momento no se ha encontrado en la literatura ninguna investigación donde se ensaye el material un número suficiente de ciclos hasta la pérdida de sus propiedades térmicas para poder conocer su vida útil o el número de ciclos que es capaz de soportar el PCM hasta su degradación.

Por todo lo anteriormente expuesto, en este trabajo se ha considerado la vida útil del material como el mayor número de ciclos soportados por un material obtenidos a partir de los estudios realizados por diferentes autores en la literatura, a pesar de no haber llegado a degradarse en su totalidad. Se ha asumido este dato como caso más desfavorable para la evaluación de impacto ambiental que se desarrollará en apartados posteriores.

#### 3.2. PCM en la edificación

Según Zhang [23] existen tres formas de aplicación de los PCM en edificación: de forma pasiva, activa y por enfriamiento nocturno mediante ventilación. En el Anexo A se explican gráficamente.

- **Aplicación de forma pasiva:** El calor o el frío almacenado se libera automáticamente cuando la temperatura interior o exterior está por encima o por debajo del punto de fusión del PCM. El PCM se puede aplicar en muros o paredes de diferentes materiales, desde fachadas exteriores de hormigón o ladrillo hasta paredes interiores de yeso, acristalamientos, techos, suelos de baldosa,... Debido a la capacidad de los PCM para almacenar y liberar calor a temperatura constante, es posible reducir las elevadas variaciones de temperatura y el consumo energético en los edificios, y contribuir a la estabilización interior de la temperatura. Por estos motivos, son especialmente adecuados para el acondicionamiento de espacios sensibles a los cambios de temperatura [24].
- **Aplicación de forma activa:** Mediante la adición de PCM en elementos activos de la construcción como sistemas de calefacción o aire acondicionado, tanques de almacenamiento de agua caliente, placas solares, suelo radiante,... donde el calor o el frío es almacenado de forma independiente al edificio. Los TES acumulan el calor para usarlo en horario diferente, pudiendo equilibrar la demanda energética y suministro. Estos sistemas pueden utilizarse para almacenar frío o calor, y pueden acoplarse con un colector solar y una bomba de calor [24].

En el presente Trabajo se va a tener en cuenta únicamente los PCM para aplicaciones en construcción de forma pasiva.

#### 3.2.1. Incorporación de PCM en materiales constructivos

Según A. Oliver [11], los distintos medios de incorporación de PCM en los materiales constructivos son:

- **Incorporación directa:** el método consiste en incorporar directamente el PCM en el elemento constructivo, por ejemplo hormigón o yeso, mezclándolo con sus componentes hidratados de cemento, hormigón o yeso en el momento de fabricación del material.

La resistencia de los materiales producidos mediante este método depende de las composiciones, como por ejemplo, la resistencia de las placas de yeso, no disminuye de forma considerable, si contienen menos de 20% en peso de PCM [11].

- **Inmersión:** Este método se utiliza principalmente en materiales de construcción porosos (como placas de yeso, ladrillos o bloques de hormigón). Éstos se sumergen en el PCM fundido en caliente, que se absorbe y rellena los poros por capilaridad. El material poroso es rellenado con PCM líquido y se deja enfriar, permaneciendo en los poros del material constructivo. Se puede convertir un panel ordinario en un sistema con PCM aunque existen inconvenientes como el tiempo necesario de inmersión, la pérdida de propiedades en los ciclos térmicos y la posibilidad de fugas.

Este proceso depende de la temperatura de fusión, su viscosidad, y el tamaño de los poros. La gran superficie de contacto de los poros garantiza una buena transmisión de calor del hormigón a los PCM. Hasta ahora, los paneles pueden absorber algunos PCM en cantidades no superiores al 45% de su propio volumen. Se comprobó que las muestras bañadas con PCM se comportaban mejor que las convencionales. La estructura de algunos de estos materiales es tal que, incluso en estado líquido, los PCM pueden retenerse por el material principal debido a la tensión superficial. En cambio, otros materiales, como por ejemplo los ácidos grasos (ácido carboxílico) como PCM, hay que encapsularlos o protegerlos para evitar fugas [11].

- **Encapsulado:** Para evitar los inconvenientes del contacto directo de los PCM con los materiales constructivos que se han descrito anteriormente, estos pueden encapsularse antes de ser incorporados con cualquiera de los dos métodos vistos previamente (incorporación directa o inmersión). En las últimas décadas, la necesidad de mejorar las propiedades de transmisión térmica en el almacenamiento de calor, ha estimulado el desarrollo de importantes investigaciones sobre el encapsulado de los PCM en polímeros. El encapsulamiento del PCM puede presentarse en forma de macro o microencapsulados.
  - **Macroencapsulados:** consisten en el empaquetado del PCM en tubos, esferas, paneles u otros recipientes que, posteriormente, se incorpora a los materiales de construcción.
  - **Microencapsulado:** es un proceso físico-químico, que consiste en recubrir pequeñas partículas sólidas o líquidas de 1 a 1000 $\mu$ m de diámetro con una cápsula sólida, generalmente un polímero.

Ambos métodos se mencionan con más detalle en el Anexo A.

## 4. Metodología

Este trabajo pretende realizar un análisis ambiental basado en la metodología ACV para determinar si el ahorro de energía debido a la incorporación de PCM es lo suficientemente importante para equilibrar el impacto ambiental causado durante la fabricación del mismo.

El estudio se centra principalmente en la adición de PCM en diferentes soluciones constructivas, en los efectos que causa esta adición en el consumo de energía en calefacción y aire acondicionado durante la vida útil del edificio y en el impacto ambiental ocasionado.

El ACV es una metodología utilizada para el análisis del impacto ambiental de los productos y procesos, además, su uso está fuertemente promovida por las políticas y normativas de la Unión Europea, como el Plan de Acción Europeo (ETAP) sobre Consumo y Producción Sostenibles y una Política Industrial Sostenible, el plan de acción ETAP, etc. [25].

La estructura más actualizada para el ACV se propone en la norma ISO 14040 [26], y como se puede observar en la Figura 2, esta metodología se puede sintetizar en cuatro fases principales:

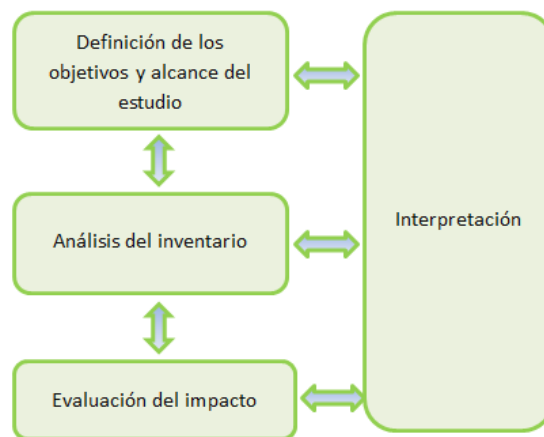


Figura 2 Fases de la metodología ACV [26]

- La primera fase se centra en la definición y alcance del objetivo que define el objetivo del estudio, la unidad funcional y de los límites del sistema estudiado.
- Después le sigue una segunda fase, el ICV donde se cuantifican todos los flujos de energía y materiales que entran y salen del sistema durante toda su vida útil.
- En la tercera fase, la evaluación de impactos, donde se realiza una clasificación y evaluación de los resultados del inventario, relacionándolos con efectos ambientales observables a través de un conjunto de categorías de impactos seleccionadas tales como el agotamiento de los recursos, el calentamiento global, la disminución de la capa de ozono, la toxicidad o el uso del suelo entre otros. En este caso, el nivel de detalle, la elección de los impactos a evaluar y los métodos de evaluación depende de los objetivos y alcance del estudio.
- Finalmente, la última fase se centra en la interpretación del ciclo de vida. Esta fase consiste en la interpretación de los resultados de la fase de inventario y de la evaluación de los impactos, con objeto de establecer conclusiones y recomendaciones para la mejora del comportamiento ambiental del sistema en estudio.

Los métodos de evaluación pueden incluir modelos de impacto intermedio (categorías tipo midpoint) y/o de impacto final (categorías endpoint). Las primeras muestran como resultado la contribución a los diferentes problemas ambientales (calentamiento global, agotamiento de la capa de ozono, etc), mientras que las categorías endpoint, evalúan el daño producido como consecuencia de dichos problemas ambientales (por ejemplo el daño a la salud humana consecuencia de la destrucción de la capa de ozono, etc) [27].

La metodología ACV intenta asociar los datos del ICV con las categorías de impacto a los problemas ambientales y los potenciales daños ambientales. Estas vías de impacto se muestran en la Figura 3 [25] como etapas del mecanismo ambiental en la metodología ACV.

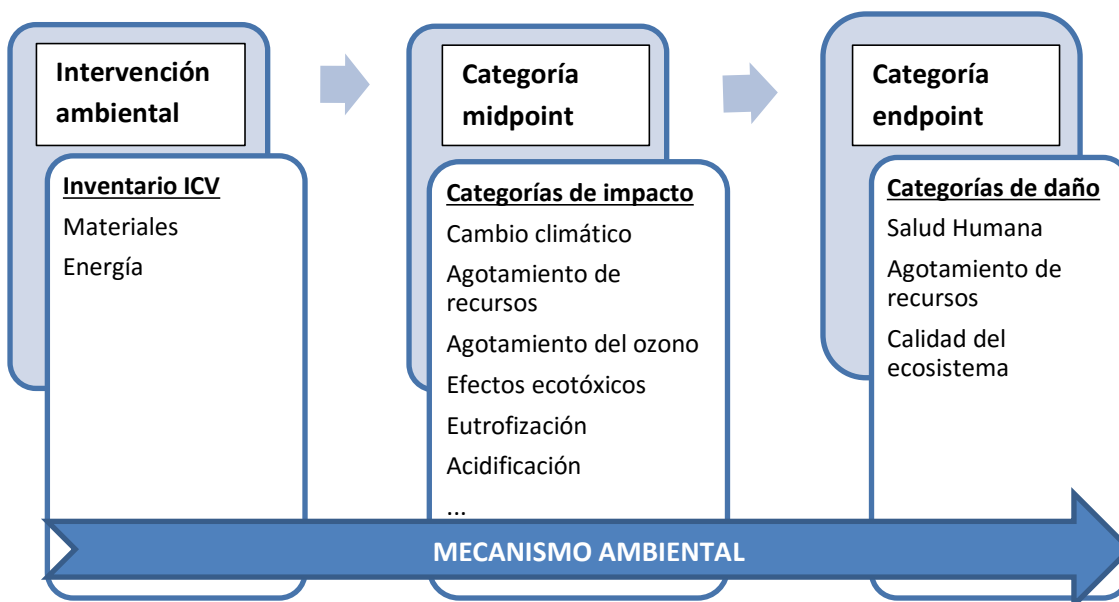


Figura 3 Etapas del mecanismo ambiental en la metodología ACV [25].

Se ha utilizado como método de evaluación RECIPE, una de los métodos más recientes y más completos disponibles para la evaluación del impacto del ciclo de vida en SIMAPRO v 7.3.3. Este método es capaz de calcular dieciocho indicadores midpoint y también el cálculo de tres indicadores endpoint [25].

## 5. Definición del sistema de estudio

En este trabajo se va a comparar el impacto ambiental que tienen varios PCM en diferentes sistemas constructivos considerando su funcionamiento a lo largo de la vida útil de un edificio. Para ello, en el Anexo B se describen algunos trabajos experimentales realizados por varios autores en diferentes elementos constructivos, que servirá para encuadrar los PCM en aplicaciones para la edificación, obteniendo datos de las mejores opciones para poder desarrollar diferentes entornos con los PCM adecuados. En particular se detallan investigaciones realizadas para PCM en yeso, hormigón y en acristalamientos.

### 5.1. Selección de PCM para la aplicación

Teniendo en cuenta los experimentos realizados por diferentes autores en los elementos constructivos desarrollados en el Anexo B, en este apartado se definen los escenarios seleccionados para posteriormente evaluar el impacto ambiental del producto (PCM) a través de todas las fases de su ciclo de vida.

Hasta ahora se ha visto la gran cantidad de aplicaciones que abarcan los PCM. La selección del PCM óptimo para cada aplicación deberá tener en cuenta, además de otras propiedades físico-térmicas, el rango de temperatura de fusión que se desee alcanzar.

Para este trabajo se pretende estudiar la incorporación de PCM en edificios que pueden servir para distintos usos, bien sea viviendas, locales comerciales, oficinas, industrias, etc. En cualquier caso la temperatura adecuada para la mayoría de los locales será la que consiga satisfacer el confort térmico humano que generalmente se encuentra en torno a los 20-24°C.

La incorporación de PCM en una aplicación concreta, requiere un análisis para determinar si el PCM mejora el rendimiento lo suficiente como para justificar los costos adicionales que supone añadir un elemento más al sistema. Para un óptimo diseño de los sistemas y la selección correcta de los materiales es necesario tener en cuenta los modelos matemáticos existentes de materiales y/o sistemas de LHS. También se debe considerar para el estudio, el comportamiento del PCM por sí mismo o dentro de sistemas específicos como encapsulamientos [28]. En este aspecto se ha realizado una revisión exhaustiva en apartados anteriores que confirma la reducción de sobrecalentamiento en los locales, la disminución de las fluctuaciones de temperatura o picos de calor en los locales en los que interviene algún tipo de PCM. Por otra parte se considera que el método de incorporación que mejor se adapta a los diferentes elementos constructivos es el PCM microencapsulado, ya que evita problemas de corrosión, fugas de material, separación de fases etc.

Con el fin de caracterizar y seleccionar correctamente el PCM adecuado es necesario conocer en profundidad sus propiedades, en particular las características termofísicas: la entalpía de cambio de fase y la temperatura. Se ha desarrollado un apartado completo analizando la vida útil de estos materiales y se ha concluido que debido a la inexistencia de trabajos experimentales realistas en los que se ensaye los materiales hasta su degradación total, para este estudio se ha optado por asumir que la vida útil de los PCM incorporados a cualquier elemento constructivo, coincide con número máximo de ciclos ensayados sin pérdida de sus propiedades termofísicas obtenidos de los estudios de referencia. Es por esta razón que se ha considerado el método de incorporación directa como el más adecuado, debido a que en el momento en que pierda sus propiedades por degradación, el material pueda ser sustituido por otro muro excepto en el caso del hormigón que se considerará que mantiene sus propiedades únicamente durante la vida útil del PCM ya que no es viable la demolición.

**Materiales PCM entre 20°C y 30°C:** numerosos autores han realizado revisiones de PCM con un amplio rango de temperaturas, como por ejemplo, Abhat [9], B. Zalba [7], L. F. Cabeza [4], E. Oró [8], Sharma [10], entre otros. Tal como se ha indicado, en aplicaciones para la edificación, se utilizan materiales con una temperatura de transición de fase próxima a la temperatura de confort humano. Otros criterios que debe cumplir son: alto

calor de fusión y conductividad térmica, alto calor específico, baja variación de volumen en el cambio de fase, que no sea corrosivo ni tóxico y que muestren poca o ninguna descomposición ni subenfriamiento. Por tanto, una primera selección de materiales viables para aplicaciones en edificios que cumplen las anteriores especificaciones, se recogen en la Tabla 1, incluyendo la información de sus propiedades y número máximo de ciclos ensayados obtenidos a partir de los estudios de Khudhair [29] y Zhang [23].

**Tabla 1 Propiedades térmicas y de estabilidad térmica de PCM aptos para edificación**

PCM	Nº ciclos ensayados	T <sub>f</sub> (°C)	ΔH <sub>f</sub> (J/g)
<b>Hexadecano</b>		18	205-236
Heptadecano	5000	19-22	150-214
CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>16</sub> CH <sub>3</sub> Octadecano	1000	22-28	205-244
Parafina comercial Micronal 5001	10000	26	110
<b>Parafina Negra</b>		25-30	150
<b>CH<sub>3</sub>(CH<sub>2</sub>)<sub>16</sub>COO(CH<sub>2</sub>)<sub>3</sub>CH<sub>3</sub> Butil estearato</b>		18-23	140
<b>CH<sub>3</sub>(CH<sub>2</sub>)<sub>11</sub>OH Dodecanol</b>		17-26	188-200
<b>CH<sub>3</sub>(CH<sub>2</sub>)<sub>12</sub>COOC<sub>3</sub>H<sub>7</sub> Propil palmitato</b>		16-19	186
<b>KF · 4H<sub>2</sub>O Fluoruro de potasio tetrahidrato</b>		18.5-19	231
CaCl <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O Cloruro de calcio hexahidrato	5650	29	171-192
<b>45% CH<sub>3</sub>(CH<sub>2</sub>)<sub>8</sub>COOH 55% CH<sub>3</sub>(CH<sub>2</sub>)<sub>10</sub>COOH 45/55 Ácido cáprico-láurico</b>		17-21	143
<b>82/18 Ácido cáprico-láurico</b>		19.1-20.4	147
65.1/32.9 Ácido cáprico-láurico	360	19.1	132
73.5/26.5 Ácido cáprico-mirístico	5000	21.4	152
<b>49/48 Estearato de butilo + palmitato de butilo</b>		17-21	138-140
<b>50/48 Estearato de butilo + palmitato de butilo</b>		18-22	140

En los últimos años, algunos PCM orgánicos están recibiendo cada vez más atención debido a no tener algunos de los problemas de los PCM inorgánicos. Tienen poco sobreenfriamiento y segregación de fases, son compatibles y adecuados con diversos materiales de construcción, sin embargo, son inflamables y tienen cambios de volumen y baja conductividad térmica. Las mezclas eutécticas se crean para mejorar las propiedades de los materiales puros por separado [23].

**Ciclos térmicos ensayados:** Teniendo en cuenta la bibliografía analizada, como se puede observar en la Tabla 1, algunos de los materiales preseleccionados para su aplicación carecen de información acerca del número de ciclos térmicos para determinar su vida útil. Por lo tanto, para la elección del PCM (próximo paso), los PCM que se desconozca el número de ciclos ensayados serán descartados automáticamente, ya que, de esta forma se contempla en el estudio un aspecto importante como es el tiempo de vida útil del PCM que se explicará en el apartado 5.2.

**Elección de los PCM para los casos de estudio:** Se ha realizado teniendo en cuenta los factores descritos hasta el momento y escogiendo un material de cada tipo según la clasificación realizada en este trabajo para poder comparar resultados según las tipologías de los materiales y sus características. Resumiendo los criterios de selección de los PCM:

- $T_f$  entre 20-30°C para asegurar el confort térmico.
- $\Delta H_f$  apropiados, ente 130-240 J/g.
- Se conocen experimentalmente los ciclos de vida y son relativamente elevados, lo que supone menor número de reemplazos de material.
- Existen experimentos realizados que demuestran la posible incorporación del PCM en distintas soluciones constructivas.

Por tanto se han seleccionado finalmente cuatro PCM que se aplican sobre tres soluciones constructivas (yeso, hormigón y fachada de vidrio). Quedando 15 casos de estudio como se puede observar en la Tabla 2.

Tabla 2 Casos de estudio

PCM ( $T_f$ °C, $\Delta H_f$ kJ/kg)	Yeso	Hormigón	Fachada de vidrio
<b>Parafina comercial Micronal 5001 (26, 110)</b>	Yeso-Parafina (YP)	Hormigón -Parafina (HP)	Vidrio-Parafina (VP)
<b>Heptadecano (21, 171)</b>	Yeso-Heptadecano (YH)	Hormigón - Heptadecano (HH)	Vidrio -Heptadecano (VH)
<b>CaCl<sub>2</sub> · 6H<sub>2</sub>O (29, 180) Cloruro de calcio hexahidrato</b>	Yeso-CaCl <sub>2</sub> (YC)	Yeso-CaCl <sub>2</sub> (HC)	Vidrio -CaCl <sub>2</sub> (VC)
<b>73.5/26.5 Ácido cáprico-mirístico (21.4, 152)</b>	Yeso-CápricoMirístico (YCM)	Hormigón - CápricoMirístico (HCM)	Vidrio - CápricoMirístico (VCM)
	Yeso sin PCM (Y)	Hormigón sin PCM (H)	Vidrio sin PCM (V)

## 5.2. Determinación de la vida útil del PCM

Para el estudio del comportamiento de los PCM en cada elemento constructivo se han seleccionado los materiales indicados en el apartado anterior. Se tiene en cuenta como vida útil de cada material únicamente el número de ciclos térmicos máximos ensayados en lo que el PCM mantiene su estabilidad según los resultados de estudios previos existentes. Muy probablemente estos materiales tengan una vida útil superior al número de ciclos ensayados, sin embargo se va tomar éste como el caso más desfavorable. Como mínimo cada PCM tendrá una vida útil equivalente al número de ciclos que soporte sin variar de forma significativa sus propiedades termofísicas.

Para conocer la vida útil del material en años se realiza una conversión considerando que cada día se produce un ciclo completo de fusión-solidificación del PCM. Esta conversión también se realiza suponiendo el caso más desfavorable ya que el número de ciclos que realiza un material depende de factores como el clima, la estación, la temperatura de fusión del PCM escogido, entre otros. Asimismo se ha tenido en cuenta que el proceso de fusión-solidificación transcurre uniformemente en toda la extensión que ocupa el PCM.

Como ejemplo, suponiendo una media de 365 ciclos al año en un clima como el de Madrid, continental mediterráneo, un material que ha sido estudiado hasta 5000 ciclos, va a desempeñar su función durante al menos 13.5 años en las condiciones previstas según los estudios realizados. Y 1000 ciclos equivaldrían a casi 3 años. A partir del número de ciclos ensayado no se asegura que el material vaya a seguir manteniendo las propiedades termofísicas adecuadas para las que ha sido diseñado por lo que se debería proceder a desmantelar el panel de PCM y sustituirlo por uno nuevo. Para el análisis de ciclo de vida que se realizará en posteriores apartados se tendrá en cuenta este aspecto.



### 5.3. Descripción del sistema

En la Figura 4 se describen las fases del sistema estudiado desde la fabricación y montaje de materiales que incluye la energía empleada en la fabricación, la energía consumida durante los 50 años en el edificio y la etapa de eliminación de los componentes implicados.

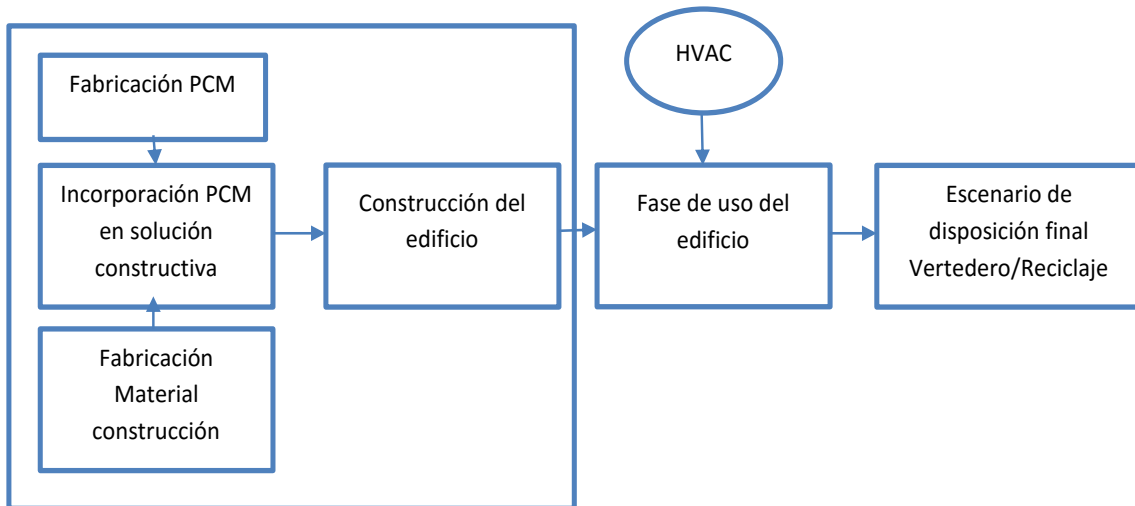


Figura 4 Diagrama de flujo de las etapas del PCM y la solución constructiva durante el ciclo de vida

Hay varios datos a tener en cuenta en la evaluación de impacto ambiental.

- La etapa de eliminación considera la disposición en vertedero de los PCM al final de la fase de uso.
- En las etapas comunes a ambas situaciones (construcción del edificio con PCM o sin PCM), su contribución al impacto ambiental es la misma, simplificando la comparativa según el diagrama de la Figura 4.
- La línea que une los tres bloques de fabricación del material y construcción del edificio se han tenido en cuenta en la herramienta como un único bloque de entrada de materiales.
- Además, en este estudio, las etapas de transporte de los materiales PCM a la fábrica de yeso, hormigón o vidrio, no se incluyen en la evaluación.

Para la caracterización de la fase de uso del edificio, se ha realizado un estudio específico del comportamiento de los diferentes casos de estudio a través de una simulación de una vivienda mediante el software de código libre ESPr. Ésta es una herramienta de simulación avanzada de energía en los edificios que permite la descripción térmica del PCM incorporado en la construcción de un edificio. Se trata de una herramienta validada que ha sido utilizada en numerosos trabajos tal como recoge Soares [30].

En este proyecto su uso se centra para la simulación del comportamiento energético del edificio y sus elementos, incluyendo el cálculo de los consumos energéticos debidos a las variaciones de temperatura en el exterior de la vivienda prototipo y sus propiedades estructurales a lo largo de un año. Con esta herramienta informática se han realizado simulaciones de los 15 casos de estudio incluyendo PCM, así como los correspondientes a estructuras de referencia sin PCM, para una climatología dada y se han comparado los casos para determinar los ahorros obtenidos en los consumos energéticos para climatización debidos a la aplicación del PCM.

Como vivienda modelo se ha diseñado un cubículo de 4x4x2.7m con una ventana en la zona sur de superficie 3.78m<sup>2</sup> y una puerta en la zona norte de 1.68m<sup>2</sup>, cuya representación puede verse en la Figura 5 Por otro

lado, se ha tenido en cuenta un clima mediterráneo continentalizado como el de Madrid para la caracterización de los casos de estudio durante un periodo de 50 años, vida útil de un edificio estándar.

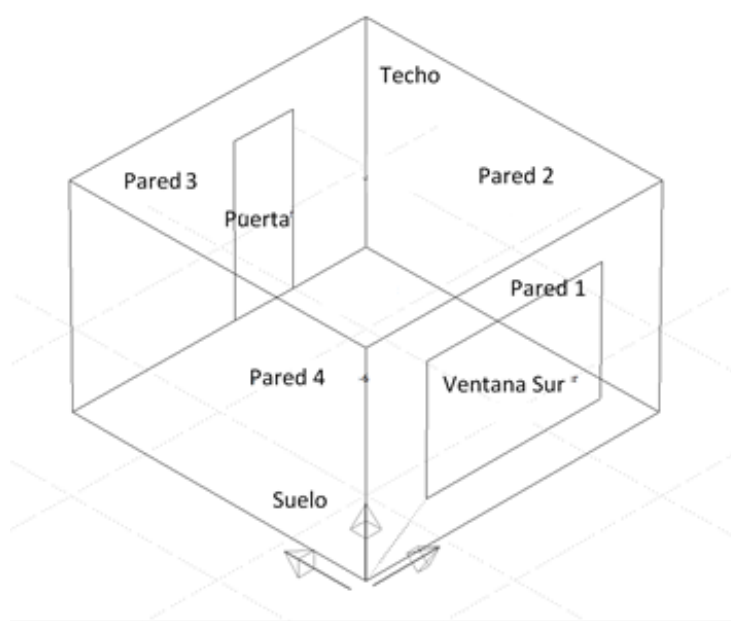


Figura 5 Diseño de la vivienda modelo

Los diferentes PCM seleccionados se han instalado en los muros verticales 1-4 en cada una de las soluciones constructivas seleccionadas: Yeso, Hormigón y Vidrio. La ventana, la puerta, el techo y el suelo permanecen sin PCM.

La estructura de los muros y otros elementos constructivos, se han tomado del Catálogo de Elementos Constructivos ISOVER para la Edificación (según CTE) [31]. Estos elementos varían en cada caso de estudio escogido:

- **Yeso:** En la cara exterior encontramos una hoja de fábrica de ladrillo cerámico, perforado o macizo. Mientras que el muro interior se compone de una capa de fábrica de ladrillo hueco acompañada de un revestimiento interno. En este caso el revestimiento interno es una capa de yeso con el PCM incorporado. Entre las paredes de ladrillo se aloja una capa de lana mineral de 20mm de espesor. En la Figura 6 [31] se representa la estructura.

En los casos de estudio de yeso con PCM se ha considerado la vida útil del material, menor que la vida útil del resto de materiales constructivos, por lo que para la evaluación ambiental se ha de tener en cuenta los años que el yeso con PCM incorporado va a seguir manteniendo las propiedades térmicas apropiadas y al cabo de estos años (número de ciclos del PCM) se desechará el material y se volverá a reponer tanto el yeso como el PCM, lo que supone en el conjunto de los 50 años un aumento de material y energía en la construcción del edificio respecto al caso de yeso sin PCM.

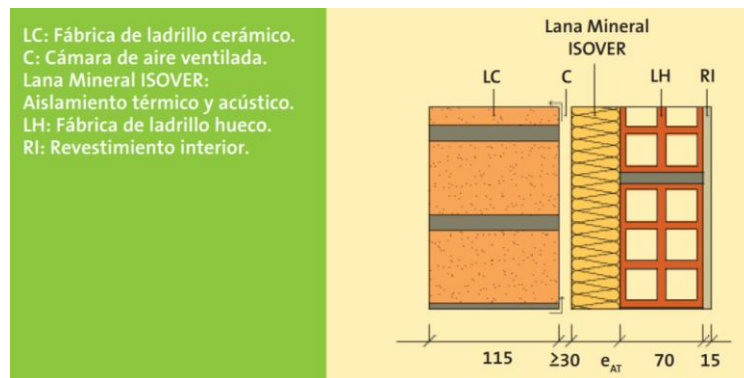


Figura 6 Solución constructiva de Yeso con PCM [31]

- **Hormigón:** El muro interior se compone de una capa de fábrica de ladrillo hueco acompañada de un revestimiento interno. Las hojas de la fachada se separan mediante una cámara de aire ventilada en la que se aloja la lana mineral unida a la hoja interna, es decir, aislamiento por el interior. En la Figura 7 [31] se representa la estructura.

En los casos de estudio de hormigón con PCM se ha considerado la vida útil del material, al igual que el caso del yeso comentado anteriormente menor que la vida útil del resto de materiales constructivos, por lo que para la evaluación ambiental se tendrá en cuenta los años de vida del PCM, con la diferencia de que en este escenario no se puede sustituir el hormigón sin derribar el edificio por completo. Se calculará la energía que se ahorra durante los años en los que el PCM mantiene sus propiedades y el consumo de energía el resto de los años será un caso de Hormigón sin PCM.

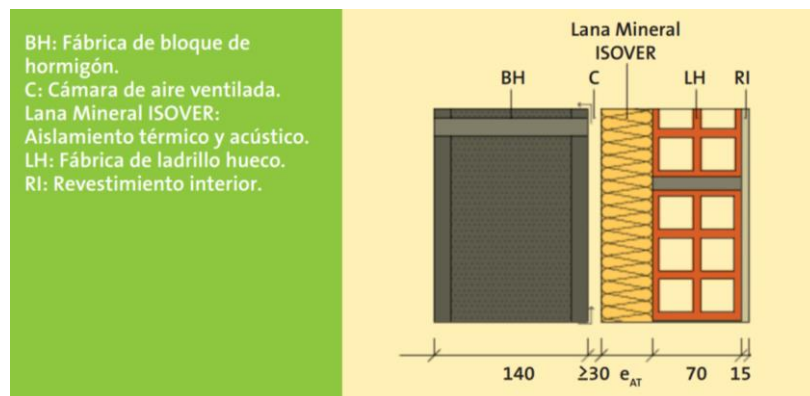


Figura 7 Solución constructiva de Hormigón con PCM [31]

- **Vidrio:** Se ha supuesto el caso de fachada de vidrio como una doble ventana de cristal con una cámara de aire entre ambas hojas. Y en los casos en los que se incorpora el PCM, se sustituye la capa de aire por una lámina del PCM correspondiente.

Al igual que en el caso del Yeso en el momento que el que el PCM pierde sus propiedades térmicas será necesaria la sustitución del material (tanto el PCM como el vidrio) por lo que supondrá un aumento al coste de material.

#### 5.4. Unidad funcional y temporal del estudio

Cómo se ha comentado anteriormente, la vida útil de un edificio destinado a viviendas u oficinas se ha tomado como 50 años de acuerdo con el Código de Hormigón Estructural EHE-08 aprobado por el Real Decreto español 1247/2008 [32] y el Código de Acero Estructural EAE aprobado por el Real Decreto español 751/2011 [33].

La unidad funcional es una unidad de referencia utilizada para cuantificar el desempeño de un producto y relacionar entradas y salidas de un proceso. Se ha tomado como unidad funcional para la evaluación ambiental  $1\text{m}^2$  de solución constructiva. El modelo seleccionado es una habitación u oficina de  $37.74\text{m}^2$ . Se han realizado los cálculos de material y energía consumida en 50 años en ese edificio y posteriormente se ha calculado de nuevo para la unidad funcional escogida.

## 6. Inventario de ciclo de vida (ICV) del sistema

En este apartado se describe el ICV desarrollado para el análisis de los casos de estudio. Según Aranda Usón y col. [25] un ICV incluye la energía y el material involucrados en el análisis relativos a la unidad funcional previamente establecida.

Las principales fuentes de información para su construcción provienen de los cálculos y determinaciones realizadas para los casos de estudio concretos en cuanto a consumos energéticos y materiales, así como otros datos provenientes de bases de datos estandarizadas Ecoinvent v 2.2.

En primer lugar se definen las entradas y salidas de cada etapa de fabricación del edificio. En la fabricación del PCM se tiene en cuenta su vida útil y se calcula la cantidad de material necesario para toda la vida del edificio. En algunos casos como el escenario de yeso o la fachada de vidrio es necesario sustituir el muro al cabo de un determinado número de años, dependiendo de la degradación del PCM para renovarlo y continuar ahorrando energía en el edificio. En el caso del hormigón, al ser inviable la demolición del muro de hormigón, solo se tiene en cuenta el ahorro energético durante la vida útil del PCM.

La primera fase consiste en la etapa de fabricación del edificio en la que se incluyen los materiales y energía necesaria para la construcción y montaje del mismo. Posteriormente se especifica una fase de utilización del edificio donde se reflejan los consumos de energía durante los 50 años de vida del edificio en función de la unidad funcional especificada anteriormente. Y por último se representa la etapa de eliminación de los materiales de construcción al final de su vida útil.

En la Tabla 3 se muestra un extracto del ICV. El inventario completo se encuentra desglosado en el Anexo C. En la primera parte de la tabla se detallan los materiales incluidos en cada caso de estudio teniendo en cuenta el número de ciclos de vida del PCM para añadir el material correspondiente a la reposición del material en un número de años determinado y en la última fila de la tabla se anotan los consumos de energía a lo largo de 50 años referido todo a la unidad funcional. Se presenta el caso de Yeso con Parafina Micronal como PCM incorporado. El material que se ha tenido en cuenta en el ICV es el que varía de un caso de estudio a otro y por tanto al comparar entre casos tiene influencia en el análisis de impacto ambiental. Por ejemplo tanto el techo como el suelo de la habitación no se han tenido en cuenta en el cómputo de materiales ya que en todos los casos de estudio los materiales empleados son idénticos y su contribución al impacto ambiental es la misma, por lo que al comparar dos situaciones no influiría en el análisis.

**Tabla 3 Inventario del ciclo de vida para el análisis límite del sistema (datos propios). Ejemplo: caso Yeso-parafina**

<b>Yeso Parafina Micronal 10000 ciclos (27,4 años)</b>	<b>Unidad</b>	<b>Entrada</b>
<b>PCM Parafina Micronal 10mm</b>	kg	13.68
<b>LP perforado 115mm</b>	kg	117.3
<b>Lana mineral 20mm</b>	kg	0.8
<b>LH cerámico hueco doble 70mm</b>	kg	65.1
<b>Mortero 15mm</b>	kg	28.5
<b>Yeso 20mm</b>	kg	41.97
<b>Vidrio 6mm</b>	kg	1.62
<b>Puerta roble 25mm</b>	m <sup>2</sup>	0.045
<b>Consumo de energía</b>	kWh	2815.79

La energía consumida en la fase de utilización durante los 50 años de vida del edificio se ha calculado mediante la herramienta informática ESPr. Como ya se ha comentado anteriormente, es una herramienta de simulación avanzada de energía en los edificios que permite la descripción térmica del PCM incorporado en

la construcción de un edificio. Por un lado, para la cuantificación de los consumos energéticos en la vivienda, se considera en la simulación de la habitación un equipo eléctrico de ventilación, aire acondicionado y calefacción (HVAC). Por el otro lado, dichos consumos energéticos están sujetos a la regulación de una temperatura de confort fijada en ESPr de 23°C.

Se han caracterizado energéticamente los 15 casos de estudio propuestos anteriormente incluyendo PCM, así como los correspondientes escenarios sin PCM, y los resultados obtenidos se han empleado como datos para el inventario de ciclo de vida. El análisis de impacto ambiental en apartados posteriores se realiza comparando los distintos casos para valorar los ahorros energéticos.

La composición del mix eléctrico considerado para la modelización de los consumos energéticos es un parámetro crítico en la evaluación y por tanto, un aspecto significativo para la elaboración del ICV y su influencia en la carga ambiental de un proceso según Aranda y col. [25]. Por ejemplo, si el sistema estudiado se encuentra en una zona que utiliza únicamente energía hidráulica para generar la electricidad, las emisiones serían significativamente menores debido a que un ACV tiene en cuenta la naturaleza de los recursos utilizados para producir la electricidad. Uno de los objetivos de este trabajo es estudiar la situación particular de España. Por lo tanto, los impactos ambientales asociados al consumo de energía eléctrica se han evaluado considerando el mix de producción eléctrica específica en España.

Los resultados obtenidos en esta investigación tienen en cuenta el impacto debido a los procesos de conversión de energía eficiente y fuentes primarias, ya que el modelo se define para una red eléctrica específica en la evaluación ambiental realizada, en este caso la mezcla de electricidad en España.

## 7. Evaluación de impacto ambiental del sistema.

En un estudio determinado se pueden utilizar diferentes métodos de evaluación de impacto para la determinación de distintas categorías de impacto. Comúnmente, existen métodos que permiten calcular simultáneamente varios indicadores medioambientales [27].

En este proyecto, la evaluación de impacto ambiental se ha llevado a cabo mediante el software SIMAPRO v 7.3.3, y aplicando un enfoque midpoint. Para ello, se ha empleado el método de evaluación RECIPE, el cual incluye 18 categorías de impacto midpoint y 3 endpoint. Sin embargo y por concreción para el estudio, los resultados se analizarán para unas categorías de impacto en particular. Concretamente se han seleccionado tres categorías de impacto midpoint como unas de las más significativas para el sector de la construcción [27]:

- El cambio climático o huella de carbono en términos de CO<sub>2</sub> equivalente

El cambio climático puede dar lugar a efectos negativos sobre la salud de los ecosistemas, la salud humana y sobre bienes materiales. La huella de carbono está relacionada con las emisiones de GEI a la atmósfera. Se expresa como Potencial de Calentamiento Global para el horizonte de 100 años (GWP100), en dióxido de carbono equivalente kg / kg de emisión. El ámbito geográfico de este indicador es a escala global.

- La acidificación del suelo en términos de SO<sub>2</sub> equivalente

Las sustancias acidificantes causan una amplia gama de impactos sobre el suelo, las aguas subterráneas, aguas superficiales, los organismos, ecosistemas y los materiales. Es expresado como kg SO<sub>2</sub> equivalentes / kg de emisión. El lapso de tiempo es la eternidad y la escala geográfica varía entre el ámbito local y escala continental.

El método incluye: ácido nítrico (suelo, agua y aire), ácido sulfúrico (agua), trióxido de azufre (aire), cloruro de hidrógeno (agua y suelo), fluoruro de hidrógeno (agua y el suelo), ácido fosfórico (agua y suelo) y ácido sulfhídrico (suelo).

- La eutrofización del agua dulce en términos de PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> equivalente

Esta categoría de impacto incluye todos los efectos debidos a niveles excesivos de macronutrientes en el medio ambiente causados por las emisiones de nutrientes al aire, agua y suelo. Se basa en el procedimiento estequiométrico de Heijungs (1992), y se expresa como kg PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> equivalentes / kg de emisión. El destino y la exposición no está incluido, el lapso de tiempo es la eternidad, y la escala geográfica varía entre el nivel local y continental.

### 7.1. El consumo de energía en los casos de estudio

La determinación de los ahorros energéticos debidos a la utilización del PCM es una etapa importante en esta investigación, en concreto para la elaboración del ICV.

En la Tabla 4 se muestra la energía eléctrica en kWh que se consume en los distintos casos de estudio (diferentes soluciones constructivas con PCM) durante 50 años para la unidad funcional tomada (1m<sup>2</sup> de solución constructiva). En la Figura 8 los datos se expresan en porcentaje suponiendo como línea base 100% el consumo de energía del aparato HVAC en la habitación sin PCM. Esto sirve para comparar los casos con PCM del caso estándar sin PCM. Los datos han sido obtenidos de la herramienta ESPr explicada en apartados anteriores.

Tabla 4 Consumo de energía en el edificio en fase de uso durante 50 años relativa a la unidad funcional

CONSUMO ENERGÍA EN FASE DE USO (kWh/m <sup>2</sup> )	YESO	HORMIGÓN	VIDRIO
PARAFINA MICRONAL 10000CICLOS	2815.79	2937.20	8418.01
HEPTADECANO 5000 CICLOS	2811.55	2956.93	8263.71
CaCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O 5650 CICLOS	2880.71	2974.24	8307.43
CÁPRICO MIRÍSTICO 5000 CICLOS	2792.39	2953.91	8448.13
CONSTRUCCION SIN PCM	<b>2914.66</b>	<b>2985.71</b>	<b>9259.73</b>

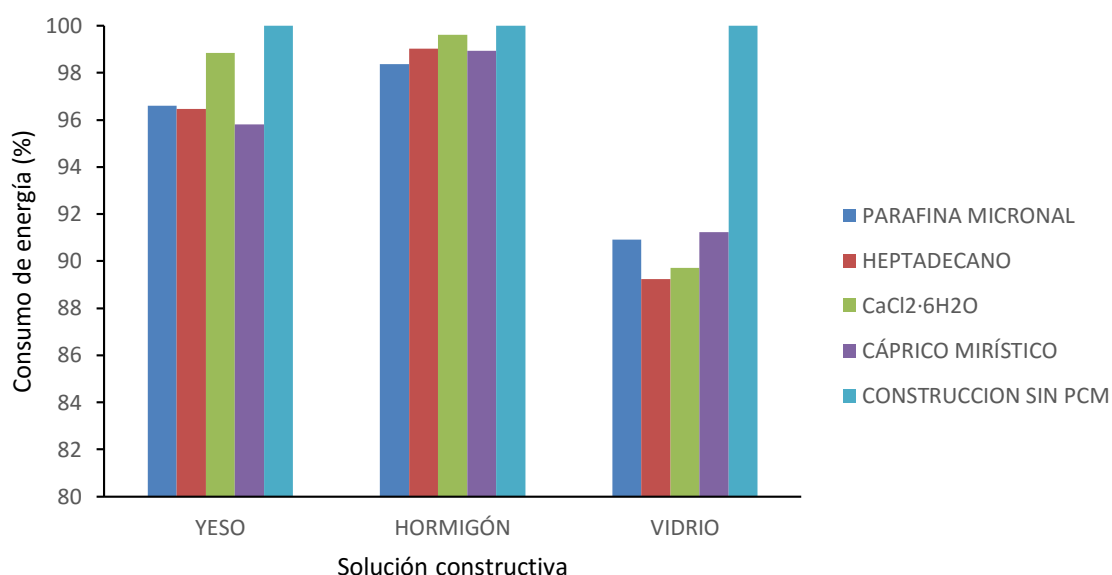


Figura 8 Consumo energía en el edificio en fase de uso durante 50 años relativa a la unidad funcional

En la Tabla 4 se puede observar que en los tres casos el consumo es máximo en la solución constructiva sin PCM y el consumo mínimo varía dependiendo del tipo de muro. Por ejemplo para el Yeso, que es la construcción con los menores consumos de energía, el PCM compuesto por el eutéctico Cáprico Mirístico es el que contribuye en mayor medida al ahorro energético en el edificio.

Se puede apreciar también en dicha tabla que la sal hidratada presenta un mayor consumo de energía en los casos de yeso y hormigón. Esto puede ser atribuido a que este PCM tiene una  $T_f$  mayor respecto a los otros PCM seleccionados, lo cual implica que posiblemente no se haya alcanzado suficiente veces dicha temperatura en la región donde el PCM está colocado. Por el contrario, se puede ver que este comportamiento no ocurre en el caso del vidrio. Esto puede ser debido a que muy probablemente se haya alcanzado la temperatura de  $T_f$  de esta sal hidratada muchas más veces debido a la incidencia de la radiación solar sobre el Vidrio/PCM,

Por otra parte, se puede observar la importancia que tiene el consumo eléctrico en el caso de la fachada de vidrio. En concreto, se aprecia como el consumo de energía en la fase de utilización, es mucho mayor que en los casos de yeso y hormigón. Este hecho se puede explicar por el tipo de estructura que compone el muro. Tanto en el yeso como en el hormigón se ha diseñado una fachada con varias capas de material, incluida una



capa de lana mineral de 20mm que contribuyen de manera significativa al aislamiento del habitáculo y por lo tanto es necesario un menor consumo de energía para la calefacción o enfriamiento de la habitación. La fachada de vidrio compuesta únicamente por dos láminas de vidrio transparente y el PCM entre ellas. Por lo tanto, menos aislada necesitando mayor cantidad de energía para conseguir la misma temperatura en el interior. También hay que considerar que los efectos de la radiación solar van a ser diferentes al resto de los casos. En otras palabras, las tres soluciones constructivas son por tanto difícilmente comparables entre sí debido a la casuística de cada uno.

No obstante, los datos de consumo eléctrico se pueden comparar teniendo en cuenta el PCM aplicado para una misma solución constructiva (con y sin PCM). En este sentido, el PCM mejora hasta un 11% el consumo de energía en el caso de la fachada de vidrio, mientras que las fachadas de yeso y hormigón se consiguen un ahorro máximo del 4%. Es decir, la fachada de vidrio es en porcentaje la que más ahorro energético consigue tras la incorporación del PCM.

Este ahorro de energía en el caso del vidrio se puede atribuir a que este tipo de sistema, a diferencia de las otras soluciones constructivas (yeso hormigón), el PCM y/o vidrio en cierta forma da hacia exterior teniendo un efecto directo sobre el paso de los rayos del sol hacia el interior del habitáculo. En otras palabras, el PCM puede tener un efecto reductor de la capacidad solar durante el día, actuando como un dispositivo de "protección solar" almacenando al mismo tiempo cierta cantidad de calor en el PCM a una temperatura constante. Es decir, puede reducir la transmisión de energía solar cambiando el comportamiento del perfil de flujo de calor permitiendo un mejor control sobre la dinámica del sistema de calentamiento solar térmico, lo cual hace más estable las condiciones del interior del habitáculo respecto al sistema referencia.

Este comportamiento fue estudiado por Francesco Goia [34] en un sistema similar (acristalamiento relleno con PCM). El autor reportó una considerable reducción de las pérdidas de energía (alrededor de un 35%). El autor sugiere que este tipo de sistemas presentan un buen rendimiento cuando se requiere disminuir la irradiación solar hacia el interior del sistema y disminuir las pérdidas de calor durante la noche, lo cual se traduce en un positivo impacto en el balance global energético del edificio.

En el caso concreto del hormigón es especialmente bajo el ahorro energético (consigue un máximo del 2%), debido a que a lo largo de los 50 años de vida del edificio sólo se considera el ahorro energético durante el periodo de vida útil del PCM.

Una conclusión importante de esta etapa, es que existe una especificidad de la selección del PCM para las condiciones constructivas concretas en las que se aplica, ya que como se ha visto no es el mismo PCM el que mayores rendimientos obtiene en todos los casos ni siguen la misma tendencia entre casos.

### 7.2. Impacto ambiental para los diferentes casos de estudio

El principal objetivo de este trabajo es determinar el impacto ambiental que tiene la aplicación de PCM en diferentes soluciones constructivas teniendo en cuenta la vida útil del mismo y valorando si el impacto del ahorro energético alcanzado compensa el impacto asociado a la fabricación y montaje del PCM en la solución constructiva y por lo tanto, existe un beneficio en términos ambientales de la utilización de esta nueva tecnología.

En la Tabla 5 y la Figura 9 se resumen los resultados de las tres categorías ambientales definidas anteriormente para los distintos casos de estudio en un edificio según la solución constructiva escogida durante 50 años de vida del edificio. Los datos de los gráficos se dan en porcentajes suponiendo un 100% el impacto ambiental de las soluciones sin PCM. Los datos de la tabla se dan en las unidades correspondientes a cada categoría de impacto midpoint estudiada.

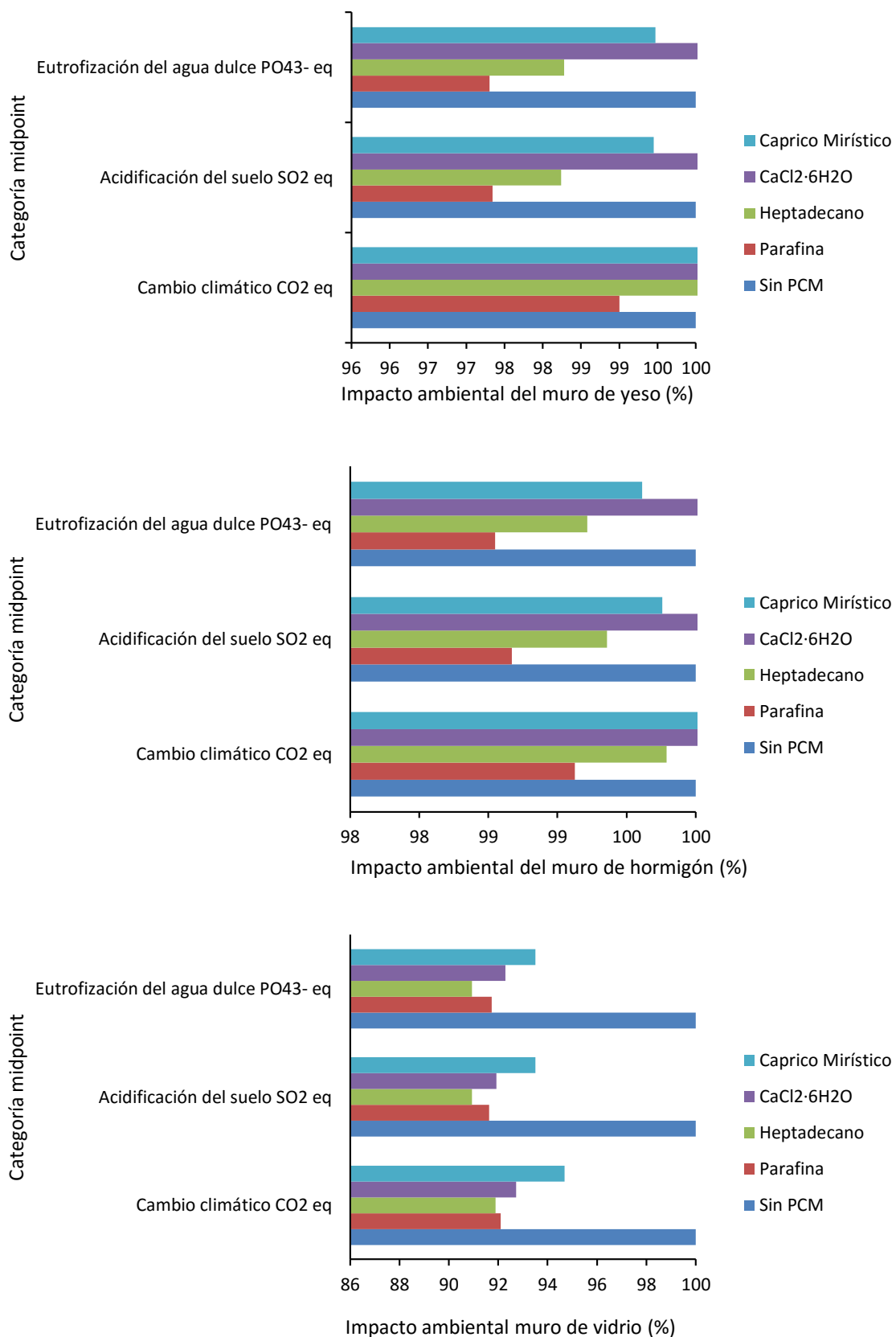


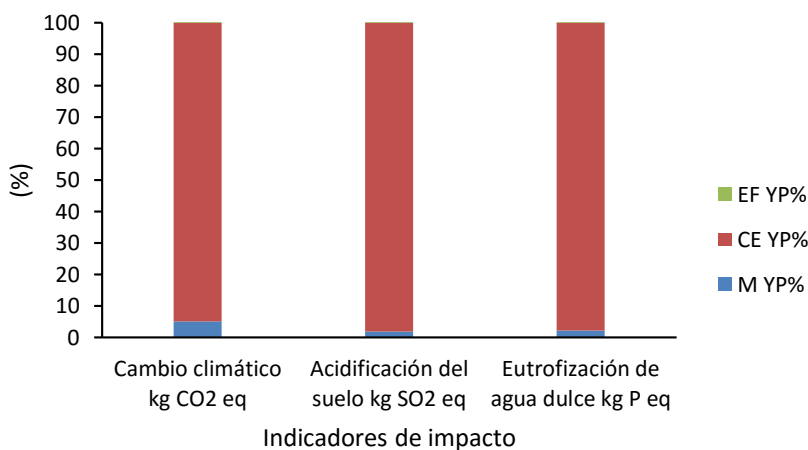
Figura 9 Impactos ambientales de los diferentes PCM analizados para las categorías de impacto midpoint más importantes. Datos en % considerando como referencia (100%) el muro sin PCM

Se puede observar en la Figura 9 el impacto ambiental de las tres soluciones constructivas con PCM analizadas. Los resultados muestran que teniendo en cuenta todas las etapas incluidas en los límites del sistema, los resultados están muy influenciados por la etapa de materiales involucrados en la fabricación, asimismo como la atribución de material debida a la reposición de los muros de yeso y vidrio al finalizar la vida útil del PCM. Se observa que los resultados varían considerablemente del análisis de cálculos de consumo de energía en fase de uso visto anteriormente en la Figura 8.

**Tabla 5: Impactos ambientales de los diferentes PCM analizados para las categorías de impacto midpoint seleccionadas como más importantes. Datos en valores absolutos para la unidad funcional (1m<sup>2</sup> de solución constructiva). Suma de Materiales (M), consumo de energía en fase de uso (CE) y escenario de disposición final en vertedero (EF).**

Unidad	M+CE+EF Y	M+CE+EF YP	M+CE+EF YH	M+CE+EF YC	M+CE+EF YCM
kg CO <sub>2</sub> eq	1687.05	1670.21	1726.79	1782.84	1756.51
kg SO <sub>2</sub> eq	12.73	12.39	12.50	13.07	12.65
kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq	0.65	0.63	0.64	0.67	0.65
Unidad	<b>M+CE+EF H</b>	<b>M+CE+EF HP</b>	<b>M+CE+EF HH</b>	<b>M+CE+EF HC</b>	<b>M+CE+EF HCM</b>
kg CO <sub>2</sub> eq	1733.19	1718.04	1729.57	1748.87	1738.87
kg SO <sub>2</sub> eq	12.99	12.82	12.91	13.08	12.96
kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq	0.66	0.658	0.66	0.67	0.66
Unidad	<b>M+CE+EF V</b>	<b>M+CE+EF VP</b>	<b>M+CE+EF VH</b>	<b>M+CE+EF VC</b>	<b>M+CE+EF VCM</b>
kg CO <sub>2</sub> eq	4835.73	4453.98	4443.55	4483.97	4578.59
kg SO <sub>2</sub> eq	40.03	36.68	36.40	36.80	37.43
kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq	2.04	1.87	1.86	1.88	1.91

Comparando soluciones constructivas se aprecia en la Tabla 5 que la fachada de vidrio, al igual que en el análisis del consumo de energía, es el caso de estudio que mayor impacto ambiental tiene en cualquiera de las categorías estudiadas. Esto es debido al elevado consumo de energía que consume la habitación en fase de utilización.



**Figura 10 Contribución de los materiales, consumo energético y escenario de disposición final del muro de yeso parafina a las principales categorías de impacto ambiental**

También en el caso del yeso y el hormigón se repite la tendencia vista en el apartado de consumo. Ambos tienen un impacto similar aunque el Yeso algo inferior al Hormigón. El consumo energético en la fase de uso del edificio tiene una gran contribución al impacto ambiental, mientras que, la fase de disposición final es casi despreciable, tal como puede apreciarse en la Figura 10.

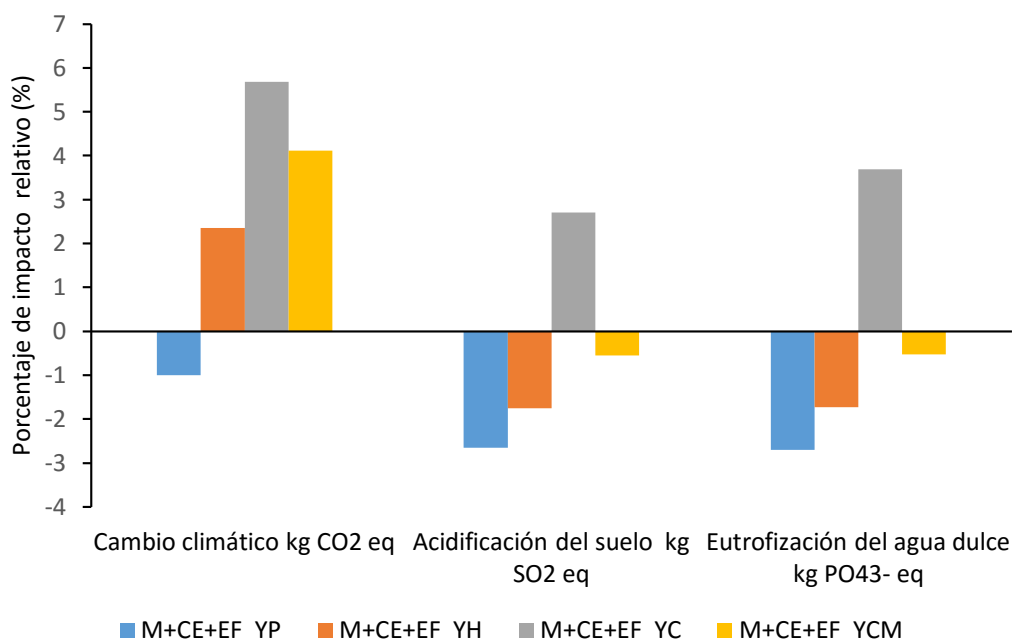


Figura 11 Porcentaje de impacto relativo al caso sin PCM en la fachada de yeso

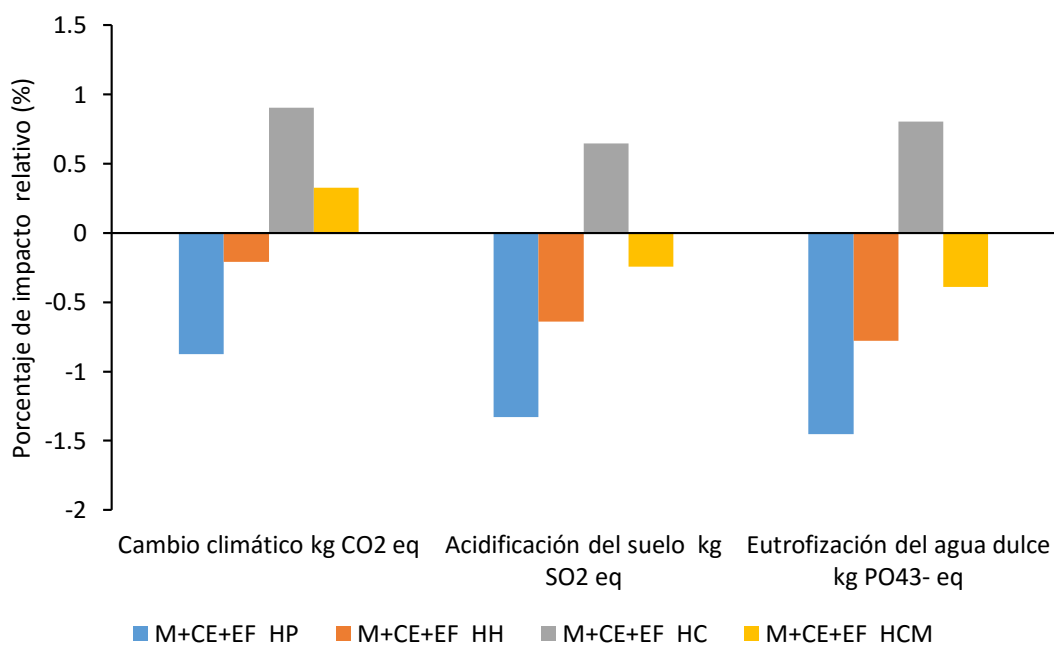
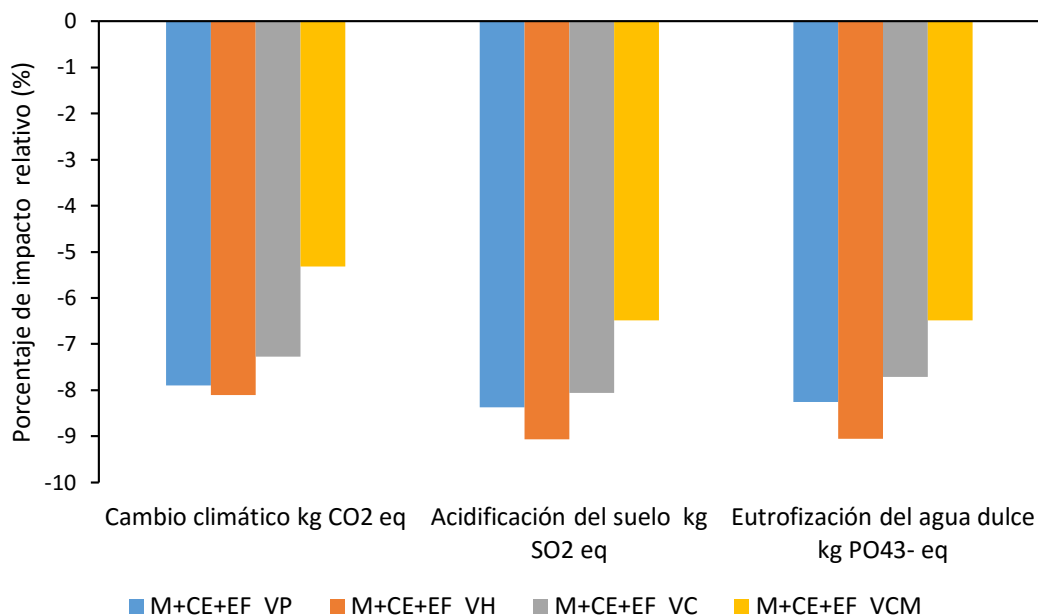


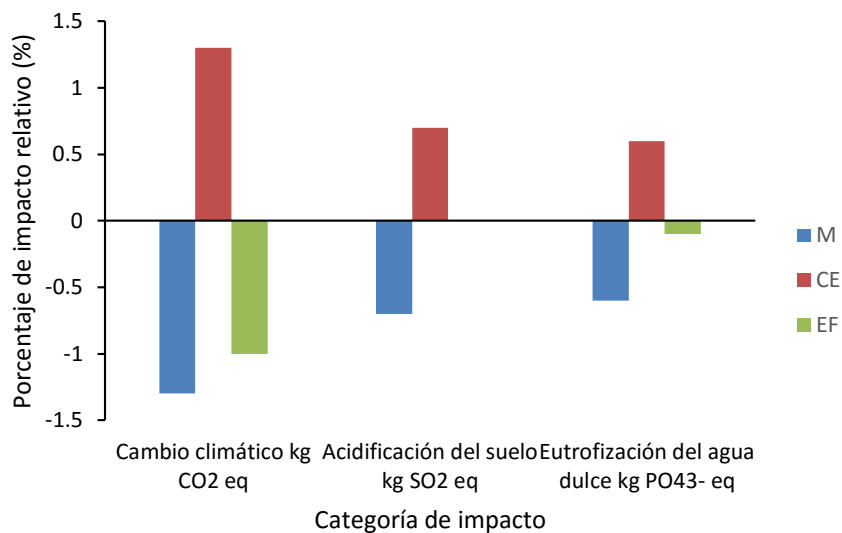
Figura 12 Porcentaje de impacto relativo al caso sin PCM en la fachada de hormigón



**Figura 13** Porcentaje de impacto relativo al caso sin PCM en la fachada de vidrio

Si se comparan entre las soluciones constructivas, los casos con y sin PCM, se puede observar que esta tendencia varía. En el análisis energético se veía como ninguno de los casos superaba al caso sin PCM, es decir que en cualquiera de los casos existía ahorro energético en la incorporación del PCM. En el caso del impacto ambiental, ocurre esto de igual forma en el caso del vidrio como puede apreciarse en la Figura 13, todos los PCM estudiados obtienen beneficios ambientales con respecto al caso sin PCM, debido a la gran diferencia en el consumo de energía respecto al muro de referencia. En los casos en que el beneficio energético no es tan elevado, la energía consumida está más igualada con el muro de referencia, los materiales juegan un mayor papel en el impacto ambiental. Es el caso de los muros de yeso y hormigón, la etapa de materiales y la disposición final de esos materiales influyen de forma importante en el impacto ambiental tal como se puede observar en el caso de comparar la solución constructiva del yeso con PCM con yeso sin PCM (Figura 14).

A la vista de los resultados mostrados en la Figura 11 y la Figura 12, se puede afirmar que en la habitación de yeso únicamente la Parafina comercial logra beneficios ambientales en términos de CO<sub>2</sub> eq. comparados con el Yeso sin PCM. Y en el caso del Hormigón, tanto la Parafina comercial como el Heptadecano consiguen mejoras de impacto ambiental en CO<sub>2</sub> eq. Aunque es la parafina la que mejores resultados obtiene en todos los casos.



**Figura 14 Contribución relativa de los materiales (M), consumo energético (CE) y escenario de disposición final (EF) del muro de yeso parafina al muro de yeso sin PCM a las principales categorías de impacto ambiental**

Concretamente es la parafina comercial el PCM que tiene beneficios ambientales en todo los indicadores de impacto antes mencionados con una vida útil asumida en 10000 ciclos, prácticamente el doble de los demás. El material con casi el doble de vida que los demás, supone un ahorro en materiales tanto en fase de construcción como en la de eliminación ya que únicamente habrá que cambiar la placa de yeso o de vidrio cada 27 años mientras que con un PCM de 5000 ciclos de vida habría que sustituir el material cada 13 años. También en el caso del hormigón hay un ahorro extra al incorporar parafina en lugar de los otros PCM debido a que a pesar de que no hay sustitución de material al cabo de los años de vida del PCM, el ahorro energético en este caso se prolonga durante casi el doble de años que en el resto de los PCM por el mismo motivo.

Por lo tanto se puede decir que desde el punto de vista ambiental, de los PCM escogidos para el estudio, la parafina comercial es la que mejor se comporta. Por el contrario, la sal inorgánica  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  tiene impactos ambientales cuando se usa en la solución constructiva de yeso y hormigón. Esto es debido principalmente, como ya se ha explicado a la diferencia de los ciclos de vida de cada PCM, ya que la sal hidratada está ensayada para mantener sus propiedades únicamente 5000 ciclos mientras que la parafina es el doble. Cabe destacar que también es importante tener en cuenta que cada uno de los PCM escogidos pertenece a un grupo distinto de materiales y por tanto sus propiedades químicas y termofísicas varían e influyen también en los resultados. La sal hidratada se ha visto anteriormente que necesita un elevado consumo de energía en fase de utilización, lo que implica un alto impacto ambiental.

En el Anexo C se pueden observar el resto de los resultados asociados a los demás indicadores de impacto de los diferentes casos de estudio más detalladamente.

## 8. Conclusiones

En este Trabajo Fin de Grado, se ha desarrollado un análisis ambiental usando la metodología ACV tomando en cuenta la vida útil del PCM seleccionado con el objetivo de valorar si el ahorro energético compensa el impacto ambiental asociado a la fabricación, montaje y eliminación del PCM. Los resultados concluyen que la incorporación de PCM en diferentes soluciones constructivas en un edificio, concretamente en muros de yeso, hormigón y vidrio, supone un ahorro de energía en la fase de utilización de un edificio lo que se traduce en un menor impacto ambiental en esta fase según el indicador ambiental analizado.

En este sentido, se ha realizado un estudio exhaustivo de los PCM para poder escoger los más adecuados a las necesidades creadas en la edificación. Para ello, se han considerado 4 tipos de PCM diferentes: Parafina comercial, Heptadecano,  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  y el eutéctico mezcla de ácido Cáprico y Mirístico. Estos PCM se han incorporado a tres soluciones constructivas distintas: yeso, hormigón y vidrio. La elección de los PCM se ha realizado en función de tres variables principales ( $\Delta H_f$ ,  $T_f$  y Nº ciclos) fijando como criterio que la  $T_f$  esté cercana al rango de temperatura de confort para un edificio y que se tenga constancia del estudio de un número lo suficientemente elevado de ciclos para suponer la vida útil del PCM basado en un elevado número de investigaciones realizadas por distintos autores. Este último criterio se basa en que los estudios sobre la estabilidad térmica o fiabilidad de los PCM son relativamente insuficientes para aportar información concreta sobre la degradación de los mismos. Por tanto, surge la necesidad de contrastar los estudios e investigaciones teóricas sobre PCM con datos probados experimentales en escenarios realistas y con sistemas de referencia. Como se ha observado en este trabajo, en los resultados sobre impacto ambiental de los PCM ensayados para el sector de la edificación, sería necesario al menos un análisis de 10000 ciclos térmicos para conseguir unos resultados ambientales aceptables.

Los principales resultados han verificado que el ahorro de energía depende de las características físicas y térmicas de los PCM tales como la temperatura de fusión y el calor latente y que también están fuertemente condicionados por la vida útil del material. Este hecho es especialmente patente en el caso de estudio con parafina comercial que demuestra que aun no siendo el que mayor rendimiento obtenía en el consumo eléctrico de 3.39% de ahorro energético frente al 4.20% que obtuvo la mezcla de Cáprico Mirístico en el muro de yeso, ha sido el que menor impacto ambiental ha tenido considerando el ACV en términos de cambio climático ( $\text{CO}_2$  eq), acidificación del suelo ( $\text{SO}_2$  eq) y eutrofización de agua dulce ( $\text{PO}_4^{3-}$ ), 5.1%, 2.1% y 2.2% respectivamente de diferencia entre ambos PCM.

De las soluciones constructivas escogidas, el vidrio es especialmente interesante por el ahorro energético que supone la incorporación de PCM, y los convenientes resultados de impacto ambiental conseguidos tras la evaluación del impacto ambiental. En cambio es preciso valorar la incorporación del PCM en vidrio en zonas donde no suponga un aumento del consumo energético de la habitación. Por ejemplo sería conveniente aprovechar la ventana de la habitación para incorporar un PCM y conseguir una disminución del consumo de energía.

Por último, de los resultados obtenidos en este estudio, se ha observado como el rendimiento energético del PCM depende de la solución constructiva donde se ha instalado, ya que para cada caso de elemento constructivo se han obtenido rendimientos máximos en diferentes PCM o incluso las tendencias de los otros no eran las mismas. Esto demuestra la necesidad de realizar una correcta selección del PCM para la aplicación a la que se destine.

## 9. Futuras perspectivas

Los PCM han sido ampliamente investigados desde su inicio hasta hoy en día y su estudio continúa en aumento debido al gran potencial que se atisba en ellos en numerosas aplicaciones como se ha expuesto en el trabajo. Actualmente la aplicación de PCM en edificación obliga a conocer profundamente las características de los materiales. Existe mucha información sobre propiedades termofísicas de los PCM, sin embargo, se considera necesario ampliar el estudio de los PCM hacia el campo de la degradación. Es preciso desarrollar la investigación de forma experimental sobre la vida útil de los PCM y realizar estudios con un elevado número de ciclos térmicos hasta la degradación completa del material. Experimentar concretamente sobre los mecanismos de degradación según las diferentes categorías de PCM. Una de las conclusiones importantes tras la realización de este trabajo es la necesidad de abarcar esta área en el estudio de los PCM de forma práctica ya que no está lo suficientemente tratada.

En futuros estudios medioambientales en los que se incorporen PCM sería interesante la elaboración de un estudio económico, para valorar la viabilidad económica de la incorporación de los mismos teniendo en cuenta el ahorro energético que se produce y no únicamente el beneficio ambiental.

El campo de aplicación de los PCM es muy amplio pero el aprovechamiento de estos materiales en la edificación requiere un gran conocimiento de las propiedades termofísicas para mejorar el rendimiento de los sistemas actuales. En concreto, el sector de la construcción contribuye en gran medida al consumo total de energía y emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera, por lo que trabajar sobre diseños eficaces puede reducir el impacto ambiental y entre otros la emisión de los GEI.



## 10. Bibliografía

1. Anisur, M.R., et al., *Curbing global warming with phase change materials for energy storage*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013. **18**(0): p. 23-30.
2. Kenisarin, M.M., *Thermophysical properties of some organic phase change materials for latent heat storage. A review*. Solar Energy, 2014. **107**(0): p. 553-575.
3. de Gracia, A., et al., *Life cycle assessment of a ventilated facade with PCM in its air chamber*. Solar Energy, 2014. **104**(0): p. 115-123.
4. Cabeza, L.F., et al., *Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011. **15**(3): p. 1675-1695.
5. Farid, M.M., et al., *A review on phase change energy storage: materials and applications*. Energy Conversion and Management, 2004. **45**(9-10): p. 1597-1615.
6. Rathod, M.K. and J. Banerjee, *Thermal stability of phase change materials used in latent heat energy storage systems: A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013. **18**(0): p. 246-258.
7. Zalba, B., et al., *Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications*. Applied Thermal Engineering, 2003. **23**(3): p. 251-283.
8. Oró, E., et al., *Review on phase change materials (PCMs) for cold thermal energy storage applications*. Applied Energy, 2012. **99**(0): p. 513-533.
9. Abhat, A., *Low temperature latent heat thermal energy storage: Heat storage materials*. Solar Energy, 1983. **30**(4): p. 313-332.
10. Sharma, A., et al., *Review on thermal energy storage with phase change materials and applications*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009. **13**(2): p. 318-345.
11. Oliver, A., *Integración de materiales de cambio de fase en placas de yeso reforzadas con fibras de polipropileno*. 2009.
12. Feldman, D. and D. Banu, *DSC analysis for the evaluation of an energy storing wallboard*. Thermochimica Acta, 1996. **272**(0): p. 243-251.
13. Oliver, A., *Thermal characterization of gypsum boards with PCM included: Thermal energy storage in buildings through latent heat*. Energy and Buildings, 2012. **48**(0): p. 1-7.
14. Feldman, D., et al., *Obtaining an energy storing building material by direct incorporation of an organic phase change material in gypsum wallboard*. Solar Energy Materials, 1991. **22**(2-3): p. 231-242.
15. Solé, A., et al., *Stability of sugar alcohols as PCM for thermal energy storage*. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2014. **126**(0): p. 125-134.
16. Alkan, C. and A. Sari, *Fatty acid/poly(methyl methacrylate) (PMMA) blends as form-stable phase change materials for latent heat thermal energy storage*. Solar Energy, 2008. **82**(2): p. 118-124.
17. Sari, A., *Thermal reliability test of some fatty acids as PCMs used for solar thermal latent heat storage applications*. Energy Conversion and Management, 2003. **44**(14): p. 2277-2287.
18. Sari, A. and K. Kaygusuz, *Some fatty acids used for latent heat storage: thermal stability and corrosion of metals with respect to thermal cycling*. Renewable Energy, 2003. **28**(6): p. 939-948.
19. Behzadi, S. and M.M. Farid, *Long term thermal stability of organic PCMs*. Applied Energy, 2014. **122**(0): p. 11-16.
20. Ryu, H.W., et al., *Prevention of supercooling and stabilization of inorganic salt hydrates as latent heat storage materials*. Solar Energy Materials and Solar Cells, 1992. **27**(2): p. 161-172.
21. Zhang, S., et al., *Effective dispersion of multi-wall carbon nano-tubes in hexadecane through physiochemical modification and decrease of supercooling*. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2012. **96**: p. 124-130.
22. Feilchenfeld, H., J. Fuchs, and S. Sarig, *A calorimetric investigation of the stability of stagnant calcium chloride hexahydrate melt*. Solar Energy, 1984. **32**(6): p. 779-784.
23. Zhang, Y., et al., *Application of latent heat thermal energy storage in buildings: State-of-the-art and outlook*. Building and Environment, 2007. **42**(6): p. 2197-2209.
24. Pomianowski, M., P. Heiselberg, and Y. Zhang, *Review of thermal energy storage technologies based on PCM application in buildings*. Energy and Buildings, 2013. **67**(0): p. 56-69.
25. Aranda-Usón, A., et al., *Phase change material applications in buildings: An environmental assessment for some Spanish climate severities*. Science of The Total Environment, 2013. **444**: p. 16-25.
26. Normalización, O.I.d., *ISO 14040*.

27. Zabalza Bribián, I., *Adaptación de la metodología del análisis de ciclo de vida para la evaluación y la mejora del impacto energético y ambiental de la edificación en España*. 2010.
28. Dutil, Y., et al., *Modeling phase change materials behavior in building applications: Comments on material characterization and model validation*. *Renewable Energy*, 2014. **61**(0): p. 132-135.
29. Khudhair, A.M. and M.M. Farid, *A review on energy conservation in building applications with thermal storage by latent heat using phase change materials*. *Energy Conversion and Management*, 2004. **45**(2): p. 263-275.
30. Soares, N., et al., *Review of passive PCM latent heat thermal energy storage systems towards buildings' energy efficiency*. *Energy and Buildings*, 2013. **59**: p. 82-103.
31. GOBAIN, I.S., *Catálogo de Elementos Constructivos ISOVER para la Edificación (según CTE)*.
32. BOE, *REAL DECRETO 1247/2008, de 18 de julio, por el que se aprueba la instrucción de hormigón estructural (EHE-08)*.
33. BOE, *Real Decreto 751/2011, de 27 de mayo, por el que se aprueba la Instrucción de Acero Estructural (EAE)*.
34. Goia, F., *Thermo-physical behaviour and energy performance assessment of PCM glazing system configurations: A numerical analysis*. *Frontiers of Architectural Research*, 2012. **1**(4): p. 341-347.
35. Regin, A.F., S.C. Solanki, and J.S. Saini, *Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: A review*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2008. **12**(9): p. 2438-2458.
36. Tyagi, V.V. and D. Buddhi, *PCM thermal storage in buildings: A state of art*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2007. **11**(6): p. 1146-1166.
37. Verma, P., Varun, and S.K. Singal, *Review of mathematical modeling on latent heat thermal energy storage systems using phase-change material*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2008. **12**(4): p. 999-1031.
38. Dutil, Y., et al., *A review on phase-change materials: Mathematical modeling and simulations*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011. **15**(1): p. 112-130.
39. Kenisarin, M. and K. Mahkamov, *Solar energy storage using phase change materials*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2007. **11**(9): p. 1913-1965.
40. Hadjieva, M., S. Kanev, and J. Argirov, *Thermophysical properties of some paraffins applicable to thermal energy storage*. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 1992. **27**(2): p. 181-187.
41. Sharma, S.D., D. Buddhi, and R.L. Sawhney, *Accelerated thermal cycle test of latent heat-storage materials*. *Solar Energy*, 1999. **66**(6): p. 483-490.
42. Sharma, A., S.D. Sharma, and D. Buddhi, *Accelerated thermal cycle test of acetamide, stearic acid and paraffin wax for solar thermal latent heat storage applications*. *Energy Conversion and Management*, 2002. **43**(14): p. 1923-1930.
43. Shukla, A., D. Buddhi, and R.L. Sawhney, *Thermal cycling test of few selected inorganic and organic phase change materials*. *Renewable Energy*, 2008. **33**(12): p. 2606-2614.
44. Alkan, C., K. Kaya, and A. Sari, *Preparation, thermal properties and thermal reliability of form-stable paraffin/polypropylene composite for thermal energy storage*. *Journal of Polymers and the Environment*, 2009. **17**(4): p. 254-258.
45. Sari, A., C. Alkan, and A. Karaipekli, *Preparation, characterization and thermal properties of PMMA/n-heptadecane microcapsules as novel solid-liquid microPCM for thermal energy storage*. *Applied Energy*, 2010. **87**(5): p. 1529-1534.
46. Sari, A., et al., *Micro/nano-encapsulated n-heptadecane with polystyrene shell for latent heat thermal energy storage*. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2014. **126**(0): p. 42-50.
47. BASF, Catalog.
48. Hasan, A. and A.A. Sayigh, *Some fatty acids as phase-change thermal energy storage materials*. *Renewable Energy*, 1994. **4**(1): p. 69-76.
49. Desgrosseilliers, L., et al., *Dodecanoic acid as a promising phase-change material for thermal energy storage*. *Applied Thermal Engineering*, 2013. **53**(1): p. 37-41.
50. Sharma, A., et al., *Thermal cycle test of urea for latent heat storage applications*. *International Journal of Energy Research*, 2001. **25**(5): p. 465-468.
51. Nikolić, R., et al., *New materials for solar thermal storage—solid/liquid transitions in fatty acid esters*. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2003. **79**(3): p. 285-292.

52. Sari, A. and A. Karaipekli, *Preparation, thermal properties and thermal reliability of capric acid/expanded perlite composite for thermal energy storage*. Materials Chemistry and Physics, 2008. **109**(2–3): p. 459-464.
53. El-Sebaili, A.A., et al., *Fast thermal cycling of acetanilide and magnesium chloride hexahydrate for indoor solar cooking*. Energy Conversion and Management, 2009. **50**(12): p. 3104-3111.
54. Marks, S., *An investigation of the thermal energy storage capacity of Glauber's salt with respect to thermal cycling*. Solar Energy, 1980. **25**(3): p. 255-258.
55. Porisini, F.C., *Salt hydrates used for latent heat storage: Corrosion of metals and reliability of thermal performance*. Solar Energy, 1988. **41**(2): p. 193-197.
56. Ting, K.C., P.N. Giannakakos, and S.G. Gilbert, *Durability of latent heat storage tube-sheets*. Solar Energy, 1987. **39**(2): p. 79-85.
57. Wada, T., R. Yamamoto, and Y. Matsuo, *Heat storage capacity of sodium acetate trihydrate during thermal cycling*. Solar Energy, 1984. **33**(3–4): p. 373-375.
58. Kimura, H. and J. Kai, *Phase change stability of sodium acetate trihydrate and its mixtures*. Solar Energy, 1985. **35**(6): p. 527-534.
59. Kimura, H. and J. Kai, *Phase change stability of CaCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O*. Solar Energy, 1984. **33**(6): p. 557-563.
60. Tyagi, V.V. and D. Buddhi, *Thermal cycle testing of calcium chloride hexahydrate as a possible PCM for latent heat storage*. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2008. **92**(8): p. 891-899.
61. Kimura, H. and J. Kai, *Feasibility of trichlorofluoromethane (CCl<sub>3</sub>F, R11) heptadecahydrate as a heat storage material*. Energy Conversion and Management, 1985. **25**(2): p. 179-186.
62. El-Sebaili, A.A., et al., *One thousand thermal cycles of magnesium chloride hexahydrate as a promising PCM for indoor solar cooking*. Energy Conversion and Management, 2011. **52**(4): p. 1771-1777.
63. Sun, J.Q., et al., *Thermal reliability test of Al–34%Mg–6%Zn alloy as latent heat storage material and corrosion of metal with respect to thermal cycling*. Energy Conversion and Management, 2007. **48**(2): p. 619-624.
64. Sari, A., et al., *Micro/nanoencapsulated n-nonadecane with poly(methyl methacrylate) shell for thermal energy storage*. Energy Conversion and Management, 2014. **86**(0): p. 614-621.
65. Raam Dheep, G. and A. Sreekumar, *Influence of nanomaterials on properties of latent heat solar thermal energy storage materials – A review*. Energy Conversion and Management, 2014. **83**(0): p. 133-148.
66. Qiu, X., et al., *Preparation and characterization of microencapsulated n-octadecane as phase change material with different n-butyl methacrylate-based copolymer shells*. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2014. **128**(0): p. 102-111.
67. Fauzi, H., et al., *Thermo-physical stability of fatty acid eutectic mixtures subjected to accelerated aging for thermal energy storage (TES) application*. Applied Thermal Engineering, 2014. **66**(1–2): p. 328-334.
68. Athienitis, A.K., et al., *Investigation of the thermal performance of a passive solar test-room with wall latent heat storage*. Building and Environment, 1997. **32**(5): p. 405-410.
69. Ibáñez, M., et al., *An approach to the simulation of PCMs in building applications using TRNSYS*. Applied Thermal Engineering, 2005. **25**(11–12): p. 1796-1807.
70. Feldman, D., D. Banu, and D.W. Hawes, *Development and application of organic phase change mixtures in thermal storage gypsum wallboard*. Solar Energy Materials and Solar Cells, 1995. **36**(2): p. 147-157.
71. Rudd, A.F. *Phase-change material wallboard for distributed thermal storage in buildings*. in ASHRAE Transactions. 1993.
72. Lee, T., et al., *Control aspects of latent heat storage and recovery in concrete*. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2000. **62**(3): p. 217-237.
73. Hawes, D.W., D. Banu, and D. Feldman, *Latent heat storage in concrete. II*. Solar Energy Materials, 1990. **21**(1): p. 61-80.
74. Hadjieva, M., R. Stoykov, and T. Filipova, *Composite salt-hydrate concrete system for building energy storage*. Renewable Energy, 2000. **19**(1–2): p. 111-115.
75. Manz, H., et al., *TIM-PCM external wall system for solar space heating and daylighting*. Solar Energy, 1997. **61**(6): p. 369-379.
76. Stritih, U., *Heat transfer enhancement in latent heat thermal storage system for buildings*. Energy and Buildings, 2003. **35**(11): p. 1097-1104.

77. Weinläder, H., A. Beck, and J. Fricke, *PCM-facade-panel for daylighting and room heating*. Solar Energy, 2005. **78**(2): p. 177-186.
78. Ismail, K.A.R. and J.R. Henríquez, *Thermally effective windows with moving phase change material curtains*. Applied Thermal Engineering, 2001. **21**(18): p. 1909-1923.

## Índice de figuras

Figura 1: Clasificación de los PCM [9] .....	13
Figura 2 Fases de la metodología ACV [26] .....	20
Figura 3 Etapas del mecanismo ambiental en la metodología ACV [25]. .....	21
Figura 4 Diagrama de flujo de las etapas del PCM y la solución constructiva durante el ciclo de vida .....	25
Figura 5 Diseño de la vivienda modelo .....	26
Figura 6 Solución constructiva de Yeso con PCM [31] .....	27
Figura 7 Solución constructiva de Hormigón con PCM [31] .....	27
Figura 8 Consumo energía en el edificio en fase de uso durante 50 años relativa a la unidad funcional.....	32
Figura 9 Impactos ambientales de los diferentes PCM analizados para las categorías de impacto midpoint más importantes. Datos en % considerando como referencia (100%) el muro sin PCM .....	34
Figura 10 Contribución de los materiales, consumo energético y escenario de disposición final del muro de yeso parafina a las principales categorías de impacto ambiental .....	35
Figura 11 Porcentaje de impacto relativo al caso sin PCM en la fachada de yeso.....	36
Figura 12 Porcentaje de impacto relativo al caso sin PCM en la fachada de hormigón .....	36
Figura 13 Porcentaje de impacto relativo al caso sin PCM en la fachada de vidrio .....	37
Figura 14 Contribución relativa de los materiales (M), consumo energético (CE) y escenario de disposición final (EF) del muro de yeso parafina al muro de yeso sin PCM a las principales categorías de impacto ambiental.....	38

## Índice de tablas

Tabla 1 Propiedades térmicas y de estabilidad térmica de PCM aptos para edificación .....	23
Tabla 2 Casos de estudio .....	24
Tabla 3 Inventario del ciclo de vida para el análisis límite del sistema (datos propios). Ejemplo: caso Yeso-parafina.....	29
Tabla 4 Consumo de energía en el edificio en fase de uso durante 50 años relativa a la unidad funcional ...	32
Tabla 5: Impactos ambientales de los diferentes PCM analizados para las categorías de impacto midpoint seleccionadas como más importantes. Datos en valores absolutos para la unidad funcional (1m <sup>2</sup> de solución constructiva). Suma de Materiales (M), consumo de energía en fase de uso (CE) y escenario de disposición final en vertedero (EF).....	35

## Abreviaturas

PCM	Materiales de cambio de fase
LHS	Almacenamiento de calor latente
TES	Almacenamiento de energía térmica
GEI	Gases de efecto invernadero
ACV o LCA	Análisis de ciclo de vida
ICV o LCI	Inventario de ciclo de vida
EIA	Evaluación de impacto ambiental
SEM	Microscopio electrónico de barrido
HVAC	Equipo de ventilación, aire acondicionado y calefacción
YP	Muro de Yeso con PCM Parafina comercial
YH	Muro de Yeso con PCM Heptadecano
YC	Muro de Yeso con PCM Cloruro de calcio hexahidratado
YCM	Muro de Yeso con PCM mezcla de Ácido cáprico-mirístico
Y	Muro de Yeso sin PCM
HP	Muro de Hormigón con PCM Parafina comercial
HH	Muro de Hormigón con PCM Heptadecano
HC	Muro de Hormigón con PCM Cloruro de calcio hexahidratado
HCM	Muro de Hormigón con PCM mezcla de Ácido cáprico-mirístico
H	Muro de Hormigón sin PCM
VP	Muro de Vidrio con PCM Parafina comercial
VH	Muro de Vidrio con PCM Heptadecano
VC	Muro de Vidrio con PCM Cloruro de calcio hexahidratado
VCM	Muro de Vidrio con PCM mezcla de Ácido cáprico-mirístico
V	Muro de Vidrio sin PCM
Ref	Referencia
ND	No se degrada
CTE	Código Técnico de Edificación
EHE	Código de Hormigón Estructural
EAE	Código de Acero Estructural
LP	Ladrillo perforado
LH	Ladrillo hueco
GWP100	Potencial de calentamiento Global para el horizonte de 100 años
M	Materiales
CE	Consumo de energía en fase de utilización del edificio
EF	Escenario de disposición final en vertedero

## Nomenclatura

$T_f$	Temperatura de fusión
$\Delta H_f$	Calor latente de fusión
$\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	Cloruro de calcio hexahidratado
$\text{CO}_2 \text{ eq}$	Dióxido de carbono equivalente
$\text{SO}_2 \text{ eq}$	Dióxido de azufre equivalente
$\text{PO}_4^{3-} \text{ eq}$	Ión fosfato equivalente

## **ANEXOS**

“Evaluación de impacto ambiental mediante análisis de ciclo de vida (ACV) de la incorporación de materiales de cambio de fase (PCM) en edificación”

## Tabla de contenido de Anexos

Índice de figuras de Anexos .....	48
Índice de tablas de Anexos .....	49
ANEXO A: Materiales de Cambio de Fase (PCM) .....	50
Almacenamiento de energía térmica .....	50
Clasificación de los PCM .....	52
Propiedades según clasificación. Ventajas desventajas .....	56
Degradación de PCM a partir de trabajos experimentales .....	57
Estabilidad del material .....	58
Vida útil de los PCM .....	66
PCM en la edificación .....	67
Incorporación de PCM en materiales constructivos .....	68
ANEXO B: Definición del sistema objeto de estudio .....	72
Trabajos experimentales en distintos elementos constructivos .....	72
ANEXO C: Análisis de resultados .....	79
Inventario de ciclo de vida .....	79
Impacto ambiental mediante LCA para los diferentes casos de estudio .....	87

## Índice de figuras de Anexos

Figura A-1 Sistemas de almacenamiento de energía [1].....	50
Figura A-2 Clasificación de los PCM [9] .....	53
Figura A-3 Clasificación de PCM según calor latente de fusión y temperatura de fusión [15] .....	55
Figura A-4 Comparación entre el Calor latente de fusión por unidad de masa y la Temperatura de fusión de varios PCM orgánicos e inorgánicos [6] .....	56
Figura A-5 Aplicaciones de PCM en edificios [23].....	67
Figura A-6 Algunas aplicaciones de PCM en edificios: 1) Almacenamiento de calor latente para calefactar el espacio 2) Cerramientos y sistemas compuestos con alta capacidad de almacenamiento térmico 3) Aislamiento transparente y sistemas de iluminación natural. 4) Sistemas compuestos de PCM para sombreadamiento. 5) PCM incorporado derivados del yeso y pinturas. 6) PCM para suavizar las variaciones de temperatura en los sistemas de captación solar con recirculación de aire [11].....	68
Figura A-7 Cápsulas esféricas de acero inoxidable y cilindros [11] .....	69
Figura A-8 Cápsulas esféricas de poliolefina y paneles de polipropileno [11] .....	70
Figura A-9 A la izquierda una fotografía ampliada de PCM Microencapsulados (Deltathermal), a la derecha pasta con PCM microencapsulado (Internacional Energy Agency) [11] .....	70
Figura B-1 Prototipo de sistema de muro externo TIM-PCM para almacenamiento de energía solar [76]....	76
Figura B-2 Pared prototipo vista desde el interior de la habitación [76].....	76
Figura B-3 Elementos de un muro solar con PCM. La radiación solar de onda corta pasa a través del vidrio con material aislante transparente (TIM) (1,2) que evita la transmisión de calor por convección y radiación térmica. El PCM (3) encapsulado en policarbonato, absorbe y almacena energía en forma de calor latente. El aire de ventilación de la casa se calienta en el conductor de aire (4) y se conduce a la habitación. Aislamiento (5) y enlucido (6) son materiales convencionales [77] .....	76
Figura B-4 Proceso de cristalización de S27 en acristalamiento (parte superior de la ventana) [78] .....	77
Figura B-5 Ventana con cortina móvil [79].....	78



## Índice de tablas de Anexos

Tabla A-1 Aumento de temperatura necesario para almacenar 5000KJ de energía .....	52
Tabla A-2 Comparativa de propiedades de los diferentes grupos de PCM según diferentes autores [6, 10, 11] .....	56
Tabla A-3 Propiedades térmicas de las parafinas según diversos autores y número de ciclos experimentados .....	59
Tabla A-4 Propiedades térmicas de los compuestos orgánicos no parafínicos según diversos autores y número de ciclos experimentados .....	60
Tabla A-5 Propiedades térmicas de las sales inorgánicas hidratadas según diversos autores y número de ciclos experimentados .....	62
Tabla A-6 Propiedades térmicas de metales y número de ciclos experimentados .....	64
Tabla A-7 Propiedades térmicas de los PCM eutécticos. Mezclas de compuestos orgánicos e inorgánicos según diversos autores y número de ciclos experimentados .....	64
Tabla A-8 Sistemas de incorporación de PCM [14] .....	71
Tabla B-1 Características térmicas de varias combinaciones PCM - yeso .....	72
Tabla B-2 Resultados de rendimiento en la impregnación de PCM en hormigón .....	75
Tabla C-1 ICV Hormigón .....	79
Tabla C-2 ICV Yeso .....	81
Tabla C-3 ICV Yeso .....	84
Tabla C-4 Impacto ambiental en los casos de estudio para el Yeso .....	87
Tabla C-5 Impacto ambiental en los casos de estudio para el Hormigón .....	88
Tabla C-6 Impacto ambiental en los casos de estudio para el Vidrio .....	89

## ANEXO A: Materiales de Cambio de Fase (PCM)

### Almacenamiento de energía térmica

Entre los diferentes sistemas de almacenamiento de energía que se detallan en la Figura A-1 los que se tratan en este estudio se basan en el TES y en concreto los sistemas basados en LHS.

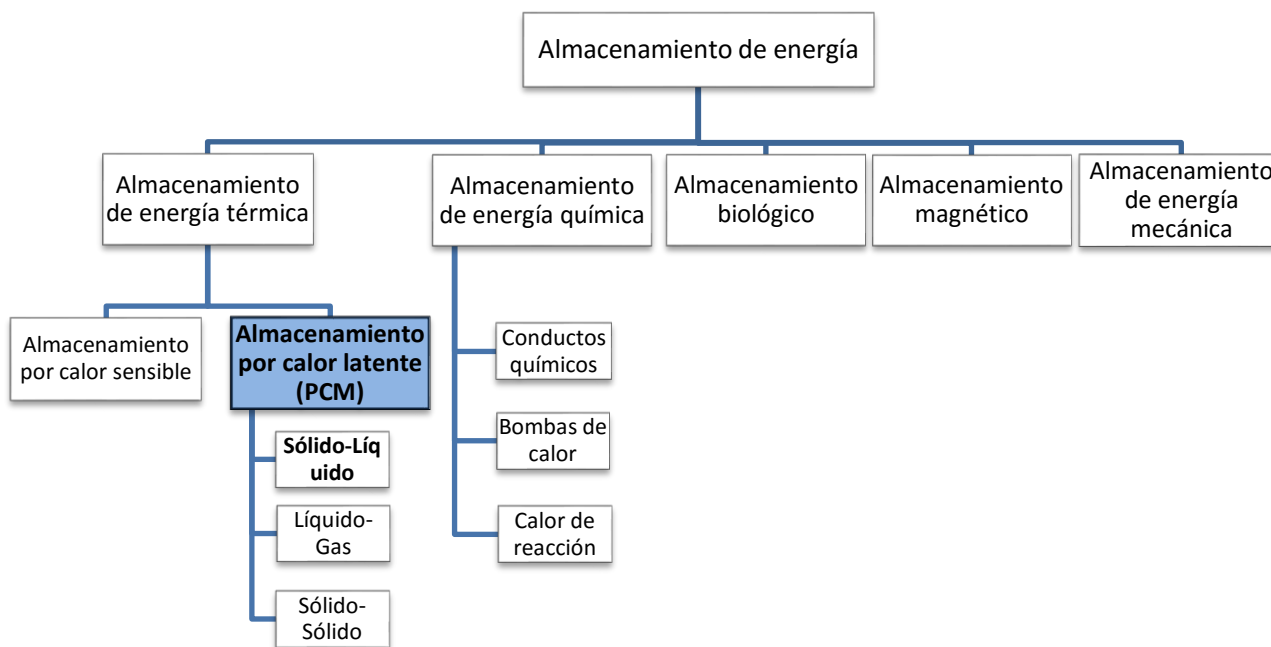


Figura A-1 Sistemas de almacenamiento de energía [1]

Principalmente se desarrollan en los estudios actuales tres posibilidades de almacenamiento de energía [7]:

- Por calor sensible, es decir, por aumento o descenso de la temperatura del material acumulador.
- Por calor latente, aprovechando la entalpía asociada a un cambio de fase.
- Por reacción termoquímica aprovechando el calor puesto en juego en la reacción.

A continuación se define cada uno de ellos según Sharma y col. [10].

#### Calor sensible

En el almacenamiento de calor sensible (SHS), una sustancia absorbe o libera energía aumentando o disminuyendo su temperatura pero sin afectar a su estructura molecular, es decir sin cambio de estado. El calor sensible es directamente proporcional a la diferencia de temperatura a la que es sometido el cuerpo y su masa. La constante de proporcionalidad se denomina calor específico de la sustancia. La Ecuación A-1 muestra el calor sensible y su relación con la temperatura.

$$Q = \int_{T_i}^{T_f} m \cdot c_p \cdot dT = m \cdot c_{ap} \cdot (T_f - T_i)$$

Ecuación A-1 Calor sensible

Desde hace mucho tiempo se ha pensado en aprovechar la inercia térmica de los materiales para disminuir los consumos energéticos. El control térmico natural de los espacios habitables ha sido una práctica

tradicional en todas las culturas. En la actualidad se están llevando a cabo nuevos experimentos basados en el calor sensible de los materiales para acondicionamiento incluso de urbanizaciones.

### Calor latente

Calor latente es la energía que absorbe o libera una sustancia cuando se somete a un cambio de fase, su estructura molecular o su estado de hidratación. Durante la transformación de la estructura molecular del material para el cambio de fase, la temperatura se mantiene constante. El calor liberado o absorbido es proporcional a la masa del material y al calor latente de cambio de fase,  $H$  (kJ/kg). Este cambio de fase puede ser de la siguiente forma: sólido-líquido, sólido-gas, líquido-gas y viceversa. Pero también podría ser un cambio en la estructura sólida como pasar de la estructura cristalina a la amorfa; o entre la cantidad de agua absorbida en un material.

La capacidad de almacenamiento del sistema de almacenamiento de calor latente (LHS) con un medio de PCM está dada por la Ecuación A-2:

$$Q = m \cdot \Delta h_m$$

Ecuación A-2 Calor latente

### Energía termoquímica

Los sistemas termoquímicos se basan en la energía absorbida y liberada en la ruptura y la unión de los enlaces moleculares en una reacción química completamente reversible. En este caso, como puede observarse en la Ecuación A-3, el calor almacenado depende de la cantidad de material, el calor endotérmico de la reacción, y el grado de conversión.

$$Q = m \cdot a_r \cdot \Delta h_r$$

Ecuación A-3 Energía termoquímica

Entre los sistemas de almacenamiento de energía que se han definido, el LHS es un concepto interesante ya que permite obtener una alta capacidad de almacenamiento de energía, entre 100 y 200 veces mayor que el SHS y tiene la ventaja de almacenar energía a una temperatura constante (que es la temperatura que corresponde al cambio de fase del material). Por ejemplo, se emplea 80 veces más energía para fundir una masa dada de agua (hielo) que para elevar la misma cantidad de agua 1°C [28].

El almacenamiento de calor latente se puede lograr a través de transformaciones de fase sólido-líquido, líquido-gas, sólido-gas y sólido-sólido. Sin embargo, aunque las transiciones sólido-gas y líquido-gas se asocian con mayor calor latente de fusión, debido a los grandes cambios de volumen en el cambio de fase, que hacen el sistema complejo y poco práctico, se descarta su utilidad como TES. Es por ello que las transformaciones sólido-líquido y sólido-sólido son las estudiadas para desarrollar aplicaciones de almacenamiento de calor latente [6]. En las transiciones sólido-sólido, el calor es almacenado cuando el material se transforma de una forma cristalina a otra. Estas transiciones tienen generalmente bajos calores latentes. En cambio el almacenamiento de calor latente por transición de fase sólido-líquido es una técnica especialmente atractiva, ya que proporciona una alta densidad de energía de almacenamiento y tiene la capacidad de almacenar energía en forma de calor latente de fusión a una temperatura constante correspondiente a la temperatura de transición de fase de los PCM [35].

Por lo tanto se puede afirmar que al almacenar una cierta cantidad de energía utilizando el calor latente que aporta el cambio de fase se necesita mucho menor peso y volumen de material que para conseguir la misma cantidad de energía mediante el calor sensible.

Un ejemplo práctico de este hecho se puede observar en la Tabla A-1 desarrollada por Regin y col. [35], donde se pueden observar las características térmicas de la cera de parafina (PCM sólido-líquido). Por ejemplo: 20.51 kg de masa de una cera de parafina puede almacenar o liberar 5000 kJ de energía en su punto de fusión (59.9°C) asumiendo su temperatura inicial de 35°C. Para almacenar la misma cantidad de energía, otro medio de almacenamiento de calor sensible tendría que calentar hasta temperaturas mucho más elevadas como se muestra en la Tabla A-1 [35].

**Tabla A-1 Aumento de temperatura necesario para almacenar 5000KJ de energía**

Material de almacenamiento de calor	Aumento de temperatura (°C)
Cera de parafina	59.9 *
Agua	93.17
Cemento	311,4
Roca	312
Hierro fundido	486.4

\* Temperatura de fusión.

El almacenamiento térmico mediante calor latente con PCM ofrece una serie de ventajas respecto a los otros sistemas para su uso en edificación, como son:

- Su elevada densidad de almacenamiento energético –especialmente en estrechos rangos de temperatura-, muy superior a la forma de calor sensible (salvo el hielo, cuya capacidad es similar incluso superior a algunas sales) ya que toda la energía se utiliza para el cambio de estado.
- Al no aumentar la temperatura con el almacenamiento energético, tampoco aumentan las pérdidas energéticas derivadas de ello que se mantienen en un nivel razonable durante el proceso de carga y descarga de energía.
- No requiere la ejecución de grandes instalaciones, ni el desarrollo de grandes infraestructuras para su aplicación en la edificación.
- La temperatura de trabajo necesaria (proceso de carga y descarga energética del material), se puede seleccionar dentro del rango de temperaturas utilizado en edificación (20 -30 °C). Se evitan así variaciones de temperatura fuera del rango de confort. En contraposición la forma de almacenamiento térmico mediante reacciones químicas, de elevada densidad de almacenamiento, tienen una temperatura de trabajo superior a los 100 °C, que obliga a incorporarlas como parte de sistemas activos (máquinas e instalaciones, que requieren suministro energético para su funcionamiento).

En los materiales utilizados habitualmente en construcción tales como hormigón y yeso sólo es representativa la capacidad de almacenamiento de calor sensible, que varía aproximadamente entre 0.75 y 1 kJ/kg·K. Algunos materiales parafínicos, que se someten a cambio de fase tienen una capacidad de acumulación debido al calor latente de aproximadamente 110kJ/kg sin variar prácticamente la temperatura durante la transformación. Debido al alto potencial de almacenamiento de calor, se necesita un volumen mucho menor del material para almacenar la misma cantidad de energía y por otra parte, gracias a que durante el cambio de fase su temperatura permanece casi constante, se minimizan las fluctuaciones de temperatura en los espacios y también se evitan temperaturas demasiado elevadas en las superficies construidas [24].

### Clasificación de los PCM

Existen algunos autores que han estudiado profundamente diferentes aspectos de los PCM. Entre otros: Zalba y col. [7], realizan una revisión de los materiales de cambio de fase, de sus propiedades y aplicaciones, en

donde detallan exhaustivamente un listado de materiales incluyendo las propiedades termofísicas. Farid y col. [5], hacen un estudio de los PCM en general, de los encapsulamientos y aplicaciones, mientras que, Zhang y col. [23], analizan los PCM en aplicaciones de construcción. Tyagi y Buddhi [36], efectúan una revisión exhaustiva de los diversos métodos para la calefacción y la refrigeración en los edificios. Regin y col. [35], revisan el desarrollo de tecnologías de almacenamiento de energía térmica de calor latente disponibles. Verma y col. [37], quienes analizan los modelos matemáticos existentes en el almacenamiento de energía térmica de calor latente (LHS). Sharma y col. [10] resumen diferentes investigaciones y analizan de los sistemas de almacenamiento de energía térmica disponibles que incorporan PCM para su uso en diferentes aplicaciones. Dutil y col. [38] realizan una revisión de los modelos matemáticos basados en las leyes de la Termodinámica, mostrando los resultados obtenidos por numerosos autores según diferentes configuraciones y Cabeza y col. [4] que muestran una revisión de diferentes publicaciones sobre el uso de PCM en edificios [28].

Una posible clasificación de los PCM para la transformación de fase sólido-líquido según [6, 9] se presenta en la Figura A-2.

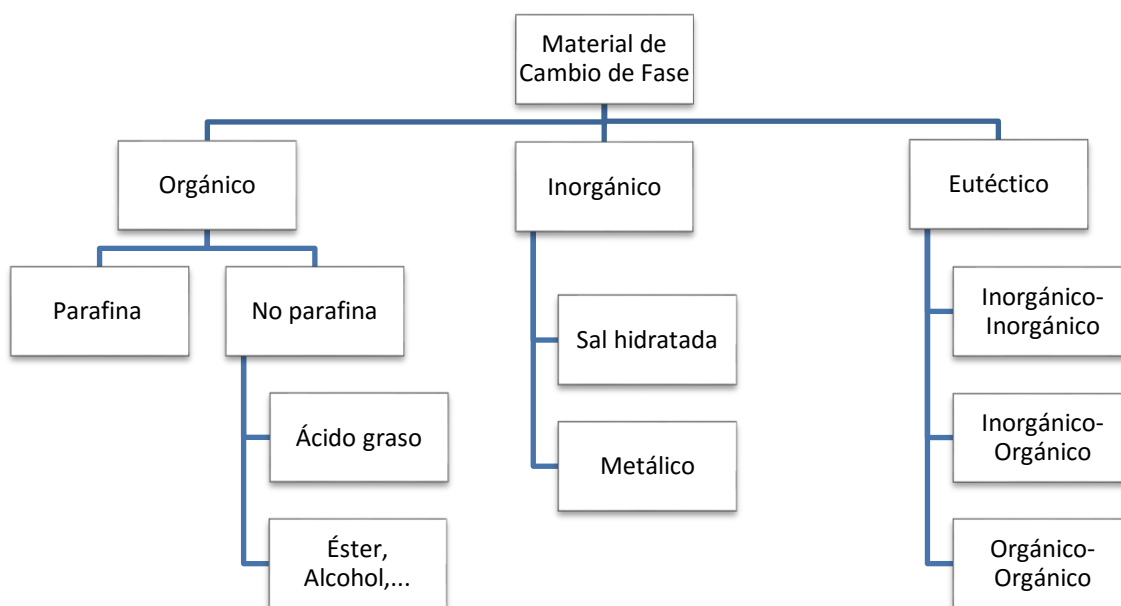


Figura A-2 Clasificación de los PCM [9]

Los **materiales orgánicos** se clasifican en parafínicos y no parafínicos. Los materiales orgánicos poseen fusión congruente, es decir funden y se congelan repetidamente sin segregación de fases y la consiguiente degradación de su calor latente de fusión. Cristalizan con poco o ningún sobreenfriamiento y por lo general no son corrosivos con el recipiente que los alberga [10].

- La cera de parafina consiste en una mezcla de cadena lineal de n alcanos  $\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_n-\text{CH}_3$ . La cristalización de las cadenas  $(\text{CH}_2)_n$ , liberan una gran cantidad de calor latente. Tanto el punto de fusión y el calor latente de fusión aumentan con el aumento de longitud de la cadena. Las parafinas se consideran como PCM interesantes debido a su disponibilidad en una amplia gama de temperaturas. La parafina es segura, fiable, predecible, menos costosa que otros compuestos y no corrosiva. Son químicamente inertes y estables por debajo de 500 °C, muestran pequeños cambios de volumen en fusión y tienen baja presión de vapor en forma fundida. Por estas propiedades de las parafinas, los sistemas que utilizan parafinas generalmente tienen ciclos de congelación-fusión

prolongados. No obstante, además de las características favorables de las parafinas, tales como fusión congruente y buenas propiedades de nucleación, también muestran algunas propiedades indeseables: baja conductividad térmica, no son compatibles con recipientes de plástico y son moderadamente inflamables. Todos estos efectos no deseables, pueden ser parcialmente eliminados modificando ligeramente la cera y la encapsulación de la misma.

- Los materiales orgánicos no parafínicos son los más numerosos de los materiales de cambio de fase con propiedades muy variadas. Cada uno de estos materiales tiene sus propiedades características a diferencia de las de parafina, que tienen propiedades muy similares. Estos materiales son inflamables y no deben ser expuestos a una temperatura excesivamente alta, llamas o agentes oxidantes. Algunas de las características de estos materiales orgánicos son los siguientes:
  - Alto calor de fusión.
  - Inflamabilidad.
  - Baja conductividad térmica.
  - Puntos bajos de ignición.
  - Variado nivel de toxicidad.
  - Inestabilidad a altas temperaturas.

Los ácidos grasos tienen valores de calor de fusión altos comparados a los de parafina. También muestran un comportamiento de fusión y congelación reproducible y se congelan sin sobreenfriamiento. Se pueden calificar como buenos PCM aunque su principal inconveniente, es su coste, que es 2-2.5 veces mayor que el de las parafinas. También son poco corrosivos.

Los **materiales inorgánicos** de cambio de fase, se clasifican como hidratos de sal y metálicos. Estos PCM no tienen una  $T_f$  marcada y sus  $\Delta H_f$  no sufren variaciones importantes con un número elevado de ciclos.

- Las sales hidratadas pueden considerarse como aleaciones de sales inorgánicas y agua formando un sólido cristalino típico de fórmula general  $AB \cdot nH_2O$ . La transformación sólido-líquido de los hidratos de sal es en realidad una deshidratación de la sal hidratada, aunque este proceso se asemeja termodinámicamente a la fusión o solidificación. Un problema con la mayoría de los hidratos de sal es la fusión incongruente, causada por el hecho de que el agua liberada de la cristalización no es suficiente para disolver toda la fase sólida presente. Debido a la diferencia de densidad, el hidrato inferior (o la sal anhidra) se establece en la parte inferior del recipiente. La mayoría de sales hidratadas también tienen propiedades de nucleación pobres dando lugar a sobreenfriamiento del líquido antes de la cristalización. Una solución a este problema es añadir un agente de nucleación, que proporciona el núcleo con que se inicia la formación de cristal. Otra posibilidad es conservar algunos cristales, en una pequeña región fría, para servir como núcleos. Las sales hidratadas son los PCM que más estudios han albergado para uso en sistemas de almacenamiento de energía térmica de calor latente. Las propiedades más atractivas de hidratos de sal son:
  - Alto calor latente de fusión por unidad de volumen.
  - Conductividad térmica relativamente alta (casi el doble de la parafina).
  - Pequeños cambios de volumen en la fusión.
  - No son muy corrosivos.
  - Compatible con los plásticos.
  - Ligeramente tóxicos.
  - Muchas sales hidratadas son lo suficientemente baratas para el uso en el almacenamiento de energía térmica.
- Los materiales metálicos aún no se han considerado seriamente por la tecnología PCM debido al inconveniente del peso. Sin embargo, cuando lo que interesa es el volumen, son buenos candidatos

a causa de la alta temperatura de fusión por unidad de volumen. Tienen altos niveles de conductividad térmica, por lo que no se requieren materiales de relleno. Algunas de las características de estos materiales son:

- Bajo calor de fusión por unidad de peso.
- Alto calor de fusión por unidad de volumen.
- Alta conductividad térmica.
- Bajo calor específico.
- Relativamente baja presión de vapor.

Se consideran **materiales eutécticos** de cambio de fase los compuestos de dos o más componentes, cada uno de los cuales se funde y solidifica congruentemente formando una mezcla de los cristales durante la cristalización. No tienen normalmente segregación de fases.

Tal como se ha indicado anteriormente, en este trabajo el rango de temperatura apropiado para el estudio es entre 20-30°C. La Figura A-3 [11, 15] muestra los tipos de PCM existentes en función del calor latente de fusión y la temperatura de fusión de los mismos. La Figura A-4 [10] presenta varios PCM concretos según la clasificación dada para diferentes temperaturas de fusión.

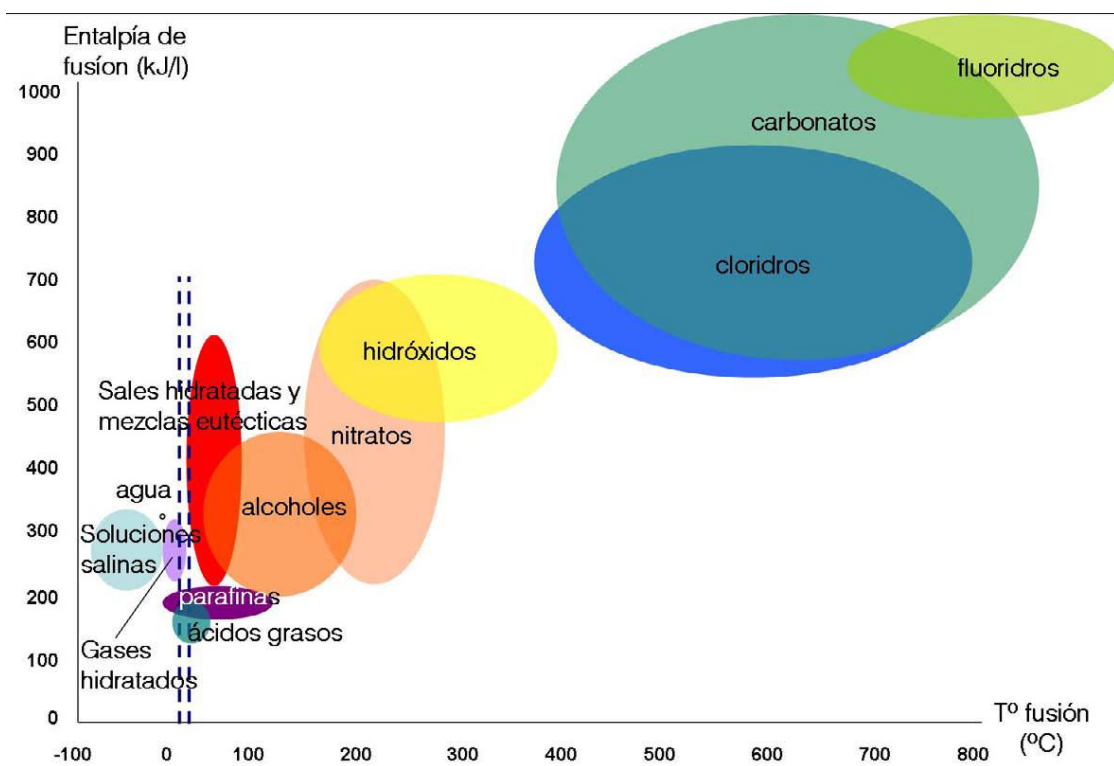


Figura A-3 Clasificación de PCM según calor latente de fusión y temperatura de fusión [15]

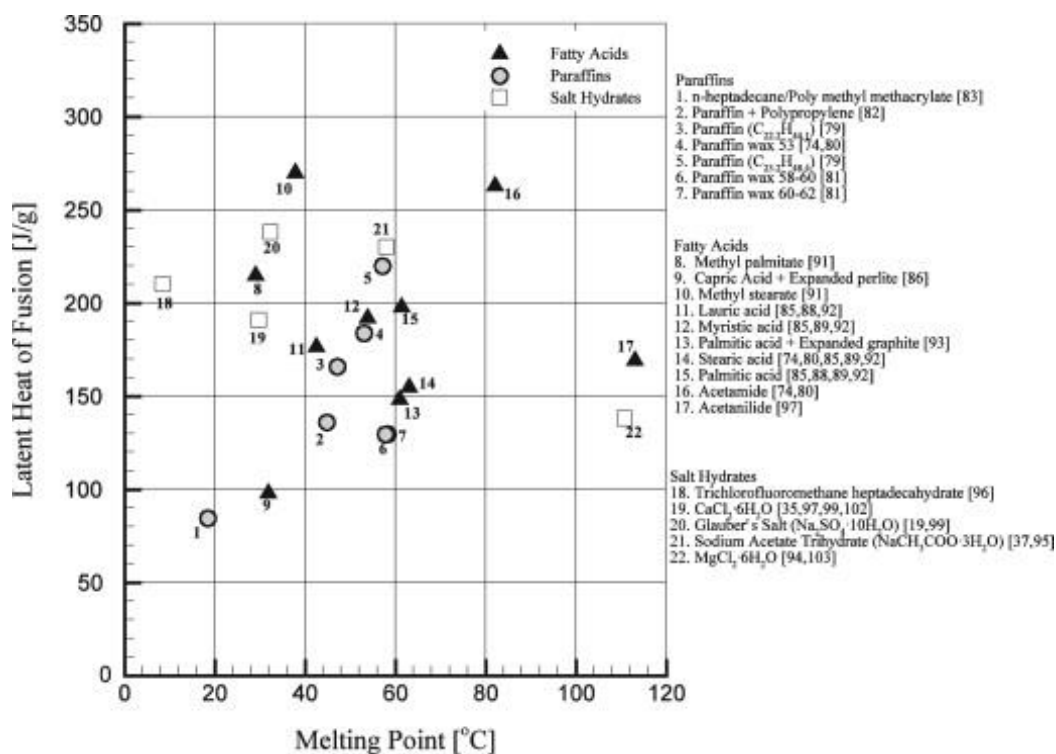


Figura A-4 Comparación entre el Calor latente de fusión por unidad de masa y la Temperatura de fusión de varios PCM orgánicos e inorgánicos [6]

### Propiedades según clasificación. Ventajas desventajas

Según la clasificación realizada anteriormente, las características de los PCM orgánicos e inorgánicos han sido evaluadas por A. Abhat [9] y así como por otros autores [6, 10, 11], cuyas conclusiones se resumen en la Tabla A-2.

Tabla A-2 Comparativa de propiedades de los diferentes grupos de PCM según diferentes autores [6, 10, 11]

	Orgánicos		Inorgánicos		Eutécticos
	Parafinas	No parafinas (ácidos grasos)	Sales hidratadas	Metales	
<b>Fórmula</b>	C <sub>n</sub> H <sub>2n+2</sub> (n=12-38)	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>n</sub> COOH	AB·nH <sub>2</sub> O	–	–
<b>Punto de fusión</b>	-12–71 °C	7.8–187 °C	11–120 °C	30–96 °C	4–93 °C
<b>Calor latente de fusión</b>	190–260 J/g	130–250 J/g	100–200 J/g	25–90 J/g	100–230 J/g
<b>Características</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ Punto de fusión y calor latente aumenta con la longitud de la cadena</li> <li>◦ El más utilizado como PCM comercial</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ Fusión en un amplio rango de temperaturas y alto calor latente</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ El más antiguo y más estudiado.</li> <li>◦ Aleaciones de sales inorgánicas y agua</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ No está considerado seriamente debido a su densidad</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ Composición de dos o más componentes</li> </ul>
<b>Coste</b>	Relativamente bajo coste (comparado con otros)	Dos o tres veces más costoso que las parafinas	Bajo coste	Costoso	Costoso



	Orgánicos		Inorgánicos		Eutécticos	
	Parafinas	No parafinas (ácidos grasos)	Sales hidratadas	Metales		
<b>Ventajas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ Fusión congruente sin tendencia a segregar fases</li> <li>◦ Bajo o ningún subenfriamiento</li> <li>◦ Estabilidad química y térmica</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ Químicamente estable</li> <li>◦ No corrosivos</li> <li>◦ Compatible con todos los contenedores metálicos</li> <li>◦ Disponibilidad en una amplia gama de temperaturas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ Transformación de fase marcada</li> <li>◦ Alto calor de fusión comparado con la parafina</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ Alta entalpía de cambio de fase</li> <li>◦ Alta conductividad térmica</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ Fácil disponibilidad</li> <li>◦ Marcado punto de fusión</li> <li>◦ Menor variación de volumen que otros</li> <li>◦ Alta densidad</li> <li>◦ Compatible con los plásticos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ Elevado calor de fusión por unidad de volumen.</li> <li>◦ Alto calor de fusión por unidad de volumen.</li> <li>◦ Alta conductividad</li> <li>◦ Funde y solidifica sin segregación de fases.</li> </ul>
<b>Desventajas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ Baja entalpía de cambio de fase</li> <li>◦ Baja conductividad térmica</li> <li>◦ Inflamable. No debe exponerse a temperaturas excesivamente altas, llamas o agentes oxidantes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ No tiene bien definido el punto de fusión.</li> <li>◦ Elevada variación de volumen</li> <li>◦ No compatibles con recipientes de plástico</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ Levemente corrosivo</li> <li>◦ Variado nivel de toxicidad</li> <li>◦ Inestable a altas temperaturas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ Subenfriamiento</li> <li>◦ Corrosión</li> <li>◦ Separación de fases</li> <li>◦ Segregación de fases</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ Corrosión según el contenedor metálico</li> <li>◦ Debido a la elevada densidad, las sales se depositan en la parte inferior y reducen el volumen activo</li> <li>◦ Ligeramente tóxicos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ Bajo calor de fusión por unidad de peso</li> <li>◦ Bajo calor específico</li> <li>◦ Elevado peso</li> </ul>
<b>Ejemplos (PF en °C, Calor latente en J/g)</b>	n-tridecano (4.5, 231), parafina comercial (26, 110), n-trioctano (65,252) n-heptadecano (21, 171)	Ácido acético (16.7, 187), ácido esteárico (61, 200), ácido láurico (42, 178), otras no parafinas como ésteres, glicol, p.e., glicerina (18, 198.7), cera de abeja (61.8, 177)	CaCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O (29, 180), Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ·10H <sub>2</sub> O (32, 251), NaCl·Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ·6H <sub>2</sub> O (18, 286), MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O (48.4, 200)	Galio (30, 80.3), Galio-Galio (29.8,-),	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> +NaCl+KCl+H <sub>2</sub> O (4, 234), NH <sub>2</sub> CONH <sub>2</sub> +NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> (46, 95) Ácido Cáprico-A. Mirístico (21.4, 152) Bi-Pb-In eutéctico (70, 29)	

### Degradación de PCM a partir de trabajos experimentales

Algunos autores han trabajado en el campo experimental sobre el comportamiento de los PCM que pueden aportar conclusiones significativas sobre la degradación de los PCM. A continuación se destacan los trabajos más relevantes:

- Zalba y col. [7], presentan una revisión crítica en un sistema de almacenamiento de energía térmica utilizando los PCM de 237 fuentes. Hicieron una lista de más de 150 materiales que se utilizan como PCM, junto con sus propiedades termo-físicas. Los autores señalaron la existencia de grandes discrepancias en los datos disponibles para la temperatura de fusión y el calor latente de los mismos PCM. Una de las conclusiones realizadas por ellos era que el uso generalizado de un almacenamiento

de calor latente era limitado debido a la insuficiente estabilidad a largo plazo de estos materiales [6].

- Rathod y Banerjee [6], mostraron en una revisión reciente, los resultados de las pruebas de sobre la estabilidad térmica de los diferentes tipos de PCM para sistemas de almacenamiento de energía de calor latente. Exponen que la vida útil de PCM depende de la estabilidad térmica, estabilidad química y resistencia a la corrosión.
- Alkan en 2008 [16], estudió las mezclas de ácido grasos (SA, PA, MA, y LA) encapsulados en una matriz polimérica de Polimetilmetacrilato (en proporción 80%-20%) como nuevos tipos de PCM de forma estable. Las mezclas mantuvieron su composición incluso cuando se calentó por encima del punto de fusión del ácido graso. Los resultados admitieron una buena compatibilidad de los componentes de las mezclas, temperaturas de fase adecuadas y capacidades de almacenamiento de calor latente satisfactorias para aplicaciones LHS prácticas. Se concluyó que estas mezclas pueden ser considerados como buenos candidatos para aplicaciones tales como calefacción de edificios bajo el suelo y almacenamiento de energía solar utilizando paneles de yeso impregnados con una forma estable de PCM debido a que tienen buenas propiedades térmicas con la posibilidad de uso directo sin necesidad de una encapsulación adicional, por lo que se reduce el coste del sistema de LHS.
- Farid y col. en 2004 [5], realizaron un análisis de las propiedades de numerosos PCM y sus posibles aplicaciones y destacaron los problemas existentes en algunos PCM, como separación de fases, sobreenfriamiento y estabilidad de las propiedades térmicas a largo plazo. También observaron las dificultades que acompañan a la micro y macro encapsulación y propusieron métodos de mejora de la transferencia de calor [39].
- Varios autores como Kenisarin y Khamid [39], Rathod y col. [6], Michal Pomianowski y col. [24], Kenisarin [2] o Solé y col. [15] entre otros, coinciden en que los informes sobre la estabilidad térmica o fiabilidad de PCMs son relativamente insuficientes y en la necesidad de contrastar los estudios e investigaciones teóricas sobre PCM con datos probados experimentales en escenarios realistas y con sistemas de referencia. Una de las conclusiones más significativas hechas por Murat y Khamid [39] es que la estabilidad de las propiedades térmicas de los PCM debe analizarse para por lo menos 1000 ciclos térmicos durante el desarrollo de productos de almacenamiento de calor latente.

### Estabilidad del material

Un aspecto relevante es la vida útil de estos sistemas como ya se ha comentado, y el número de ciclos que pueden soportar sin ninguna degradación de sus propiedades térmicas. A continuación se presentan la Tabla A-3, Tabla A-4, Tabla A-5, Tabla A-6 y Tabla A-7 que reúnen información de los trabajos experimentales realizados sobre diferentes materiales, mostrando el número de ciclos que se han efectuado sin observar degradación en el material. Algunos PCM han sufrido variación en las propiedades y se indica en observaciones.

## Orgánicos parafínicos

Tabla A-3 Propiedades térmicas de las parafinas según diversos autores y número de ciclos experimentados

PCM	Nº ciclos	Observaciones	T <sub>f</sub> (°C)	ΔH <sub>f</sub> (J/g)	Ref.
<b>C<sub>22.2</sub>H<sub>44.1</sub> Calidad técnica</b>	900	ND	47.1	166	[40]
<b>C<sub>23.2</sub>H<sub>48.4</sub> Calidad técnica</b>	900	ND	57.1	220	[40]
<b>C<sub>24.7</sub>H<sub>51.3</sub> Calidad técnica</b>	900	ND	62.6		[40]
<b>Cera de parafina de calidad comercial</b>	300	ND	53	184	[41]
<b>Cera de parafina de calidad comercial</b>	1500	ND	53	184	[42]
<b>Cera de Parafina de calidad comercial</b>	600	Se observaron cambios en el ΔH <sub>f</sub> significativos	58-60	129.8	[43]
<b>Cera de parafina de calidad comercial</b>	600	Se observaron cambios en el ΔH <sub>f</sub> significativos	60-62	129.7	[43]
<b>Cera de parafina de calidad comercial</b>	1500	ND	54	184.5	[43]
<b>Parafina (70%peso) + polipropileno (30%) (PP) material de apoyo</b>	3000	ND	44.77	136.2	[44]
<b>n-Heptadecano (38% peso) con polimetacrilato de metilo</b>	5000	ND	18.4	84.7	[45]
<b>n -Heptadecano (63.3 % peso). Micro/nano encapsulado con poliestireno (PS)</b>	5000	ND El heptadecano sin encapsular se degrada completamente con el aumento de temperatura pero soporta bien las altas temperaturas encapsulado	21.48	136.89	[46]
<b>Parafina comercial Micronal</b>	10000	ND	26	110	[47]

ND: No degradación

## Orgánicos no parafínicos

Tabla A-4 Propiedades térmicas de los compuestos orgánicos no parafínicos según diversos autores y número de ciclos experimentados

PCM	Nº ciclos	Observaciones	T <sub>f</sub> (°C)	ΔH <sub>f</sub> (J/g)	Ref.
Ácido palmítico	120	Algo de sobreenfriamiento aunque se consideró insignificante para el uso de almacenamiento de calor	61.2	196.1	[6], [9]
Ácido palmítico	450	Disminuye un 10% su capacidad de almacenamiento (ΔH <sub>f</sub> ) Este autor considera 450 ciclos aprox 1 año	57.8	201.2	[48]
Ácido palmítico	1200	ND	61.3	197.9	[17]
Ácido palmítico	910	ND compatibles Acero inoxidable (SS 304L) con capa superficial de (Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) y el aluminio (Al) con capa superficial de (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	59.9	197.9	[18]
Ácido palmítico (80% peso de PA) y grafito expandido (20% en peso de EG)	3000	ND	60.9	148.3	[44]
Ácido láurico CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>10</sub> COOH	120	Algo de sobreenfriamiento aunque se consideró insignificante para el uso de almacenamiento de calor	43.5	169.3	[6], [9]
Ácido láurico CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>10</sub> COOH	1200	ND	42.5	176.6	[17]
Ácido láurico CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>10</sub> COOH	910	ND aunque peor estabilidad que palmítico y Mirístico. Compatibles Acero inoxidable (SS 304L) con capa superficial de (Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) y el aluminio (Al) con capa superficial de (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	42.6	211.6	[18]
Ácido láurico CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>10</sub> COOH	500	ND independientemente de la pureza del material (incluso a diferente grado de pureza)	43	184	[49]
Ácido mirístico C <sub>14</sub> H <sub>28</sub> O <sub>2</sub>	450	Disminuye un 10% su capacidad de almacenamiento (ΔH <sub>f</sub> ) Este autor considera 450 ciclos aprox 1año	50.4	189.4	[48]
Ácido mirístico C <sub>14</sub> H <sub>28</sub> O <sub>2</sub>	1200	ND	53	181	[17]
Ácido mirístico C <sub>14</sub> H <sub>28</sub> O <sub>2</sub>	910	ND compatibles Acero inoxidable (SS 304L) con capa superficial de (Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) y el aluminio (Al) con capa superficial de (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	53.8	192	[18]
Ácido esteárico CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>16</sub> COOH	450	Disminuye un 10% su capacidad de almacenamiento (ΔH <sub>f</sub> ) Este	65.2	209.9	[48]

PCM	Nº ciclos	Observaciones	T <sub>f</sub> (°C)	ΔH <sub>f</sub> (J/g)	Ref.
		autor considera 450 ciclos aprox 1año			
Ácido esteárico CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>16</sub> COOH	300	ND	62.6	154.6	[41]
Ácido esteárico CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>16</sub> COOH	1500	ND	63	155	[42]
Ácido esteárico CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>16</sub> COOH	1200	ND	54.7	159.3	[17]
Ácido esteárico CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>16</sub> COOH	700	ND	53.8	174.6	[18]
Acetamida	300	ND pero absorbe humedad del entorno	82.2	262.78	[41]
Acetamida	1500	ND pero absorbe humedad del entorno	82.2	263	[42]
Urea	50	Degradación en las propiedades térmicas	133	250	[50]
Metil estearato	50	ND	37.8	270	[51]
Metil palmitato	50	ND	29	215	[51]
Eritritol (C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O <sub>4</sub> )	1000	ND	118	339	[43]
Ácido cáprico (CA 55% peso CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>8</sub> COOH) y perlita expandida (EP 45% peso)	5000	ND (Añadiendo grafito expandido además mejoran la conductividad). Según autor, aplicación interesante para edificación	31.8	98.12	[52]
Acetanilida C <sub>8</sub> H <sub>9</sub> NO	500	ND compatible con recipiente de aluminio pero muestra una pequeña corrosión con el acero inoxidable	116	169.4	[53]
Mio inositol C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>6</sub>	50	Cambios polimórficos del material pero no afectan a la estabilidad térmica. Degradación por la presencia de O <sub>2</sub> . Necesitaría encapsulamiento	223	266.1	[15]
Galacticol C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> O <sub>6</sub>	18	Disminuyen los valores de entalpía y temperatura en el cambio de fase. Degradación por la presencia de O <sub>2</sub> . Necesitaría encapsulamiento	187.3	357.7	[15]
d-manitol C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> O <sub>6</sub>	50	Disminuye la ΔH <sub>f</sub> 50%. Histéresis. Degradación por la presencia de O <sub>2</sub> . Necesitaría encapsulamiento	166	279	[15]

ND: No degradación

## Inorgánicas, sales hidratadas

Tabla A-5 Propiedades térmicas de las sales inorgánicas hidratadas según diversos autores y número de ciclos experimentados

PCM	Nº ciclos	Observaciones	T <sub>f</sub> (°C)	ΔH <sub>f</sub> (J/g)	Ref.
Sal de Glauber o Sulfato de sodio Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> Nucleante Borax (Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> ·10H <sub>2</sub> O, tetraborato de sodio) y espesante arcilla (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·2SiO <sub>2</sub> ·H <sub>2</sub> O)	320	ND	32.4	238	[54]
Sal de Glauber o Sulfato de sodio Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ·10H <sub>2</sub> O	100	Los picos endotérmicos y exotérmicos relacionados con la fusión y solidificación desaparecen / no mostraron buena estabilidad	32	-	[55]
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ·nH <sub>2</sub> O (Tubos PCM)	1000	Ningún deterioro físico del contenedor (tubos de acero laminado) pero no se estudió las propiedades termofísicas del PCM	-	-	[56]
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ·1/2NaCl·10H <sub>2</sub> O	300	Los picos endotérmicos y exotérmicos relacionados con la fusión y solidificación desaparecen / no mostraron buena estabilidad	20	-	[55]
Acetato de sodio trihidrato (CH <sub>3</sub> CO <sub>2</sub> Na·3H <sub>2</sub> O) espesado con alcohol polivinílico y como nucleante pirofosfato de sodio decahidrato (Na <sub>2</sub> P <sub>4</sub> O <sub>7</sub> ·10H <sub>2</sub> O)	500	ND	58	230	[57]
Acetato de sodio trihidrato (CH <sub>3</sub> CO <sub>2</sub> Na·3H <sub>2</sub> O) como nucleante fosfato disódico (Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> )	100	Separación de fases tras 100 ciclos. El acetato puro no tolera repetidos cambios de fase sin añadir espesante. La muestra tomada era mayor que en el experimento realizado por [57]	58	252	[58]
Cloruro de calcio hexahidrato (CaCl <sub>2</sub> ·6.11H <sub>2</sub> O) como nucleante NaCl(1%peso)	1000	ND (Al disolver NaCl en CaCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O evitaron el problema de la separación de fases)	29.8	190.8	[59]
Cloruro de calcio hexahidrato (CaCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O) con nucleante cloruro de estroncio hexahidrato y espesante gel de sílice	1000	ND	28	86	[22]
Cloruro de calcio hexahidrato (CaCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O)	5650	ND Estudiaron la corrosión según contenedores y el mejor resultado el acero inoxidable	27	-	[55]
Cloruro de calcio hexahidrato (CaCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O)	1000	ND	23.26	125.4	[60]

PCM	Nº ciclos	Observaciones	T <sub>f</sub> (°C)	ΔH <sub>f</sub> (J/g)	Ref.
Triclorofluorometano heptadecahidrato (CCl <sub>3</sub> F·17H <sub>2</sub> O) (R11) nucleante fluoruro de butilamonio tetrahidrato (C <sub>4</sub> H <sub>9</sub> ) <sub>4</sub> NF·34.4H <sub>2</sub> O y espesante poliacrilamida (C <sub>3</sub> H <sub>5</sub> NO) (PAA)	100	ND	8.5	210	[61]
Hidróxido de sodio hidrato NaOH·3.5H <sub>2</sub> O	10	Los picos endotérmicos y exotérmicos relacionados con la fusión y solidificación desaparecen / no mostraron buena estabilidad	15	-	[55]
Hidróxido de sodio NaOH	1	No se pudo volver a fundir una segunda vez. La muestra ganó humedad	66	227	[43]
Hidróxido de Bario octahidrato Ba(OH) <sub>2</sub> ·8H <sub>2</sub> O	1	No apto para almacenamiento de calor. No llegó a fundirse	78	265	[43]
Tetraborato de sodio decahidrato Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> ·10H <sub>2</sub> O	1	No apto para almacenamiento de calor. Fusión a temperatura variable +4°C de lo esperado	72	138	[43]
Nitrato férrico hexahidrato Fe(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> ·6H <sub>2</sub> O	1	No apto para almacenamiento de calor. No solidificó según lo esperado	52	99	[43]
Cloruro de magnesio hexahidrato MgCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	500	No estable sin contenedor por segregación de fases, además no compatible ni con aluminio ni con acero inoxidable	111.5	155.1	[53]
Cloruro de magnesio hexahidrato MgCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	1000	Estable con agua adicional y recipiente sellado evita el sobreenfriamiento y la segregación de fases	110.8	138	[62]

ND: No degradación

## Metales

Tabla A-6 Propiedades térmicas de metales y número de ciclos experimentados

PCM	Nº ciclos	Observaciones	T <sub>f</sub> (°C)	ΔH <sub>f</sub> (J/g)	Ref.
Aleación Al - 34% Mg - 6% Zn Material de contención en ensayos de corrosión: acero inoxidable SS304L y acero al carbono C20.	1000	ND	454	314.4	[63]

ND: No degradación

## Eutécticos

Tabla A-7 Propiedades térmicas de los PCM eutécticos. Mezclas de compuestos orgánicos e inorgánicos según diversos autores y número de ciclos experimentados

PCM	Nº ciclos	Observaciones	T <sub>f</sub> (°C)	ΔH <sub>f</sub> (J/g)	Ref.
BS/BP Butil estearato (BS)–Yeso natural BS (49%) Butil estearato – BP (48%) Butil palmitato	100	ND			[6]
CA/LA Ácido cáprico – Ácido láurico (CA 65 mol%–LA 35 mol%)	120	ND			[6]
LA/PA/SA Ácido láurico, ácido palmítico, ácido esteárico (LA–PA y LA–SA) LA(77.05%)+PA(22.95%)	100	ND			[6]
MS/MP Metil estearato (86%)–Metil palmitato (14%)	50	ND	23.9		[6]
MS/CP Metil estearato (91%)–Cetil palmitato (9%)	50	ND	28.2		[6]
MS/CS Metil estearato (91%)–Cetil estearato (9%)	50	ND	22.2		[6]
LA/SA Ácido láurico, ácido esteárico (LA 75.5%–SA 24.5%)	360	ND Las variaciones se consideraron razonables			[6]
MA/PA Ácido mirístico, ácido palmítico (MA 58%–PA 42%)	360	ND Las variaciones se consideraron razonables			[6]
PA/SA Ácido palmítico – ácido esteárico (PA 64.2%–SA 35.8%)	360	ND Las variaciones se consideraron razonables			[6]
LA/MA Ácido láurico – Ácido mirístico (LA 66%–MA 34%),	1460	ND			[6]



PCM	Nº ciclos	Observaciones	T <sub>f</sub> (°C)	ΔH <sub>f</sub> (J/g)	Ref.
LA/PA Ácido láurico – ácido palmítico (LA 69%–PA 31%),	1460	ND			[6]
MA/SA Ácido mirístico – ácido esteárico (MA 64%–SA 36%)	1460	ND			[6]
CA/LA Ácido cáprico – Ácido láurico (CA 65.12% peso–LA 32.88% peso)	360	ND			[6]
CA/LA Ácido cáprico – Ácido láurico (CA 65.12% peso–LA 32.88% peso)	360	ND			[6]
CA/MA Ácido cáprico – Ácido mirístico (CA 73.5% peso–LA 26.5% peso) en perlita expandida porosa	5000	ND			[6]
CA/MA Ácido cáprico – Ácido mirístico (CA 73.5% peso–LA 26.5% peso) en perlita expandida porosa con 10% peso de grafito expandido	5000	ND Mejoró las propiedades térmicas un 58% con el grafito expandido			[6]
CA/SA Ácido cáprico – ácido esteárico (CA 83%–SA 17%)	5000	ND			[6]
Glicerol trimiristato	1000	ND	31.96		[6]
Glicerol tripalmitato	1000	ND	58.5		[6]
Glicerol triestearato	1000	ND	63.45		[6]
Ácido cáprico- 1-dodecanol	120	ND			[6]
NaCH <sub>3</sub> COO·3H <sub>2</sub> O (90%)+NaBr·2H <sub>2</sub> O (10%) y NaCH <sub>3</sub> COO·3H <sub>2</sub> O (85 %)+NaHCOO·3H <sub>2</sub> O (15%).	1000	ND			[6]
CaCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O (80 mol%)+CaBr <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O (20 mol%), Nucleante fluoruro de bario	1000	ND			[6]
CaCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O (93%)+Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O (5%)+Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O (2%) Nucleante fluoruro de bario	1000	ND			[6]
CaCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O (96%)+NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> (2%)+NH <sub>4</sub> Br (2%), Nucleante fluoruro de bario	1000	ND			[6]
CaCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O (96%)+KNO <sub>3</sub> (2%)+KBr (2%). Nucleante fluoruro de bario	1000	ND			[6]
Nitrato de magnesio hexahidrato (Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O (93%)) y cloruro de magnesio hexahidrato (MgCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O (7%))	1000	ND			[6]
Polimetilmetacrilato (PMMA)/ n-nonadecano (C19) (1:2)	5000	ND	31.23		[64]

PCM	Nº ciclos	Observaciones	T <sub>f</sub> (°C)	ΔH <sub>f</sub> (J/g)	Ref.
<b>micro/nanoencapsulado (M/N-EPCM)</b>					
RT21 comercial	200 días	Pérdida de masa sometido a elevadas temperaturas, necesario encapsulamiento			[19]
Mezcla de parafina ligera, propil éster (ácido esteárico y palmitato) (80:20)	200 días	Estable térmicamente no pérdida de masa	18-25		[19]
Parafina + óxido de grafeno	2500	El grafeno disminuye el sobreenfriamiento de la parafina			[65]
Ácido esteárico recubierto con policarbonato	1000	Buena estabilidad térmica			[65]
n-eicosano recubierto con polimetilmetacrilato (PMMA)	5000	No hay grandes variaciones de energía térmica			[65]
n-octadecano recubierto con n-butil metacrilato	1000	ND			[66]
MA/PA Ácido mirístico / ácido palmítico (MA/PA) (70/30%)	1500	ND			[67]
MA/PA/SS Ácido mirístico / ácido palmítico /estearato de sodio (MA/PA/SS) (70/30/5%)	1500	Mejor estabilidad térmica que MA/PA. También mejor estabilidad de la estructura térmica y menor variación de volumen que MA/PA			[67]

ND: No degradación

## Vida útil de los PCM

El tiempo de vida útil de un PCM viene determinado por la cantidad de ciclos térmicos que es capaz de soportar un material manteniendo su estabilidad térmica. El PCM es sometido a repetidos ciclos de calentamiento y enfriamiento en los que se miden sus propiedades térmicas, temperatura de fusión (T<sub>f</sub>) y calor latente de fusión (ΔH<sub>f</sub>) y se obtiene el número de ciclos en los que las propiedades del material no varían de forma considerable, es decir la vida útil del PCM.

Se considera un ciclo térmico en un sistema, cuando el material es sometido a un cambio de fase sólido-líquido y posterior cambio de fase líquido-sólido. Este ciclo se puede considerar un ciclo normal. A nivel experimental se realizan pruebas bajo condiciones controladas con un número de ciclos de solidificación-fusión variables, lo que se llama ensayos de ciclos térmicos acelerados. Tras el ensayo de ciclos acelerado, se analizan las propiedades termofísicas del material para determinar la fiabilidad térmica del PCM. La viabilidad económica de emplear un material LHS en un sistema depende entre otros factores, de la estabilidad del material, es decir su vida útil, y el costo de los materiales. Por lo que no debe haber cambios importantes en el punto de fusión y el calor latente de fusión con el tiempo cuando estos sean sometidos a ciclos térmicos [60].

Se puede considerar la degradación de los PCM debida a varios factores.

- Inestabilidad del propio material
  - Pérdida de las propiedades termofísicas:
    - temperatura de cambio de fase: variación de la temperatura de cambio de fase con el aumento del número de ciclos de fusión-solidificación.
    - entalpía de cambio de fase: desviación de la entalpía de cambio de fase con el aumento del número de ciclos de fusión-solidificación.

- disminución de la densidad del PCM: pérdida de masa del PCM o pérdida de agua en sales hidratadas durante el cambio de fase
    - Degradación al someter al PCM a temperatura elevada: la temperatura elevada origina en algunos materiales una pérdida de masa considerable.
    - Subenfriamiento: el material comienza a solidificar por debajo de la temperatura esperada (o sobreenfriamiento el material funde por encima de la temperatura esperada)
    - Separación de fases: el material no realiza el cambio de fase completamente sino que alguna parte permanece en estado sólido
    - Pérdida de las propiedades químicas: por ejemplo oxidación en contacto con el aire
  - Corrosión por contacto del PCM con el material contenedor
- Posibles soluciones o disminución de los efectos anteriores pueden ser:

- Agentes nucleantes
- Espesantes
- Encapsulación

### PCM en la edificación

Según Zhang [23] y tal como se muestra en la Figura A-5 [23], existen tres formas de aplicación de los PCM en edificación: de forma pasiva, activa y por enfriamiento nocturno mediante ventilación.

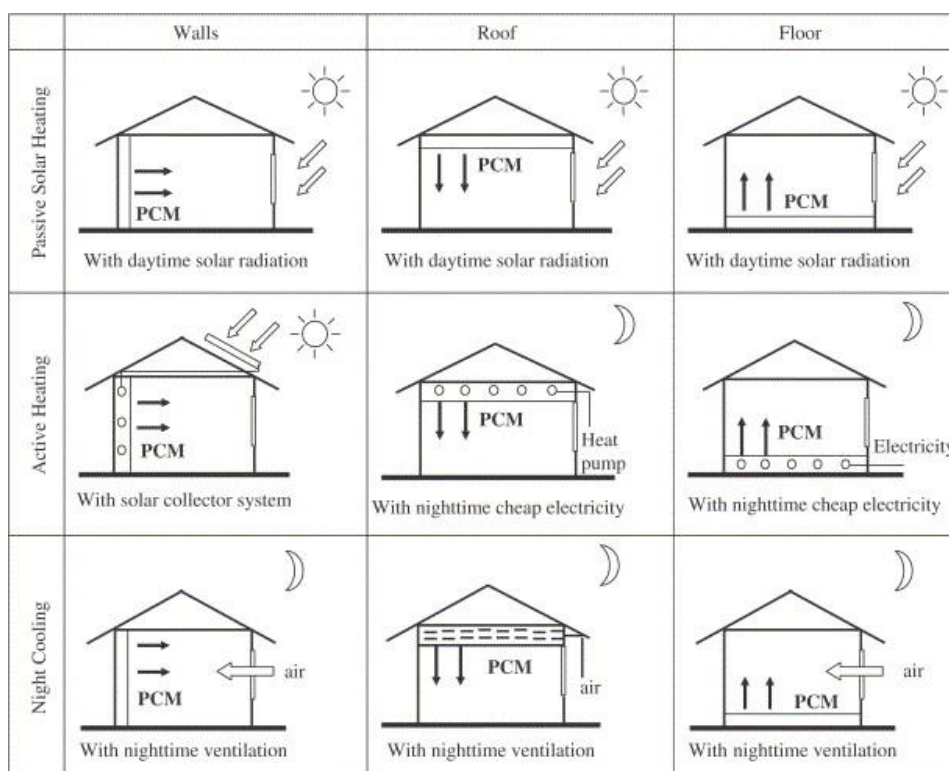


Figura A-5 Aplicaciones de PCM en edificios [23]

- Aplicación de forma pasiva: El calor o el frío almacenado se libera automáticamente cuando la temperatura interior o exterior está por encima o por debajo del punto de fusión del PCM. El PCM se puede aplicar en muros o paredes de diferentes materiales, desde fachadas exteriores de hormigón o ladrillo hasta paredes interiores de yeso, acristalamientos, techos, suelos de baldosa,... Debido a la capacidad de los PCM para almacenar y liberar calor a temperatura constante, es posible reducir las elevadas variaciones de temperatura y el consumo energético en los edificios, y contribuir

a la estabilización interior de la temperatura. Por estos motivos, son especialmente adecuados para el acondicionamiento de espacios especialmente sensibles a los cambios de temperatura [24].

- Aplicación de forma activa: Mediante la adición de PCM en elementos activos de la construcción como sistemas de calefacción o aire acondicionado, tanques de almacenamiento de agua caliente, placas solares, suelo radiante,... donde el calor o el frío es almacenado de forma independiente al edificio. Los TES acumulan el calor para usarlo en horario diferente, pudiendo equilibrar la demanda energética y suministro. Estos sistemas pueden utilizarse para almacenar frío o calor, y pueden acoplarse con un colector solar y una bomba de calor [24].

En la Figura A-6 [11] se pueden observar algunas áreas de la aplicación para PCM en los edificios.

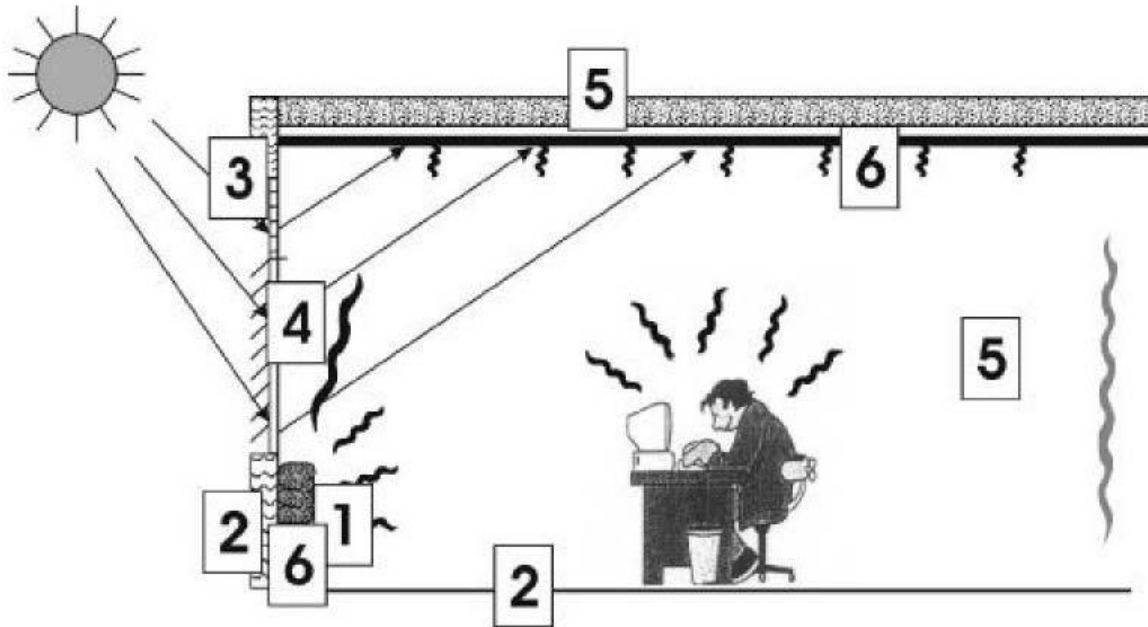


Figura A-6 Algunas aplicaciones de PCM en edificios: 1) Almacenamiento de calor latente para calefactar el espacio 2) Cerramientos y sistemas compuestos con alta capacidad de almacenamiento térmico 3) Aislamiento transparente y sistemas de iluminación natural. 4) Sistemas compuestos de PCM para sombreado. 5) PCM incorporado derivados del yeso y pinturas. 6) PCM para suavizar las variaciones de temperatura en los sistemas de captación solar con recirculación de aire [11]

### Incorporación de PCM en materiales constructivos

Según A. Oliver [11] los medios de incorporación de PCM en los materiales constructivos son: incorporación directa, inmersión y encapsulamiento.

- **Incorporación directa:** el método consiste en incorporar directamente el PCM en el elemento constructivo por ejemplo hormigón o yeso, mezclándolo con sus componentes hidratados de cemento, hormigón o yeso en el momento de fabricación del material.
- **Inmersión:** Este método se utiliza principalmente en materiales de construcción porosos (como placas de yeso, ladrillos o bloques de hormigón). Éstos se sumergen en el PCM fundido en caliente, que se absorbe y rellena los poros por capilaridad. El material poroso es relleno con PCM líquido y se deja enfriar, permaneciendo en los poros del material constructivo. Con este método se puede convertir un panel ordinario en un sistema con PCM aunque existen algunos inconvenientes como el tiempo necesario de inmersión, la pérdida de propiedades en los ciclos térmicos y la posibilidad de fugas. Este proceso depende de la temperatura de fusión, su viscosidad, y el tamaño de los poros.

La gran superficie de contacto de los poros garantiza una buena transmisión de calor del hormigón a los PCM.

- **Encapsulado:** Para evitar los inconvenientes del contacto directo de los PCM con los materiales constructivos que se han descrito anteriormente, estos pueden encapsularse antes de ser incorporados con cualquiera de los dos métodos vistos previamente (incorporación directa o inmersión). El encapsulamiento del PCM puede presentarse en forma de macro o microencapsulados.
  - Los **macroencapsulados** consisten en el empaquetado del PCM en tubos, esferas, paneles u otros recipientes que, posteriormente, se incorpora a los materiales de construcción.

Se han desarrollado métodos de encapsular los PCM primero en otros materiales como polímeros y después mezclándolo con el hormigón, para aumentar la resistencia contra el fuego y prevenir la pérdida por goteo del PCM en el hormigón. Varios experimentos demostraron la reducción de los picos de calor del PCM en el hormigón, pero son variados los inconvenientes de la técnica:

- Al introducir macrocápsulas de PCM en el hormigón, disminuye su resistencia.
- También existe una disminución de la tasa de transferencia de calor durante el proceso de solidificación debido a los bajos coeficientes de transmisión térmica de los PCM en estado sólido.
- Necesita protección y mucho más trabajo para integrarlo en cualquier material o sistema constructivo del edificio por lo que se encarece el proceso.
- Las cápsulas deben protegerse contra su destrucción durante el uso del edificio: no se puede taladrar, ni clavar en las paredes y techos donde estén presentes estas macrocápsulas.

El material del encapsulado debe ser un metal o un polímero, con forma cilíndrica, prismática o esférica tal como se muestra en la Figura A-7 y Figura A-8 tomadas del trabajo de A. Oliver [11].



Figura A-7 Cápsulas esféricas de acero inoxidable y cilindros [11]

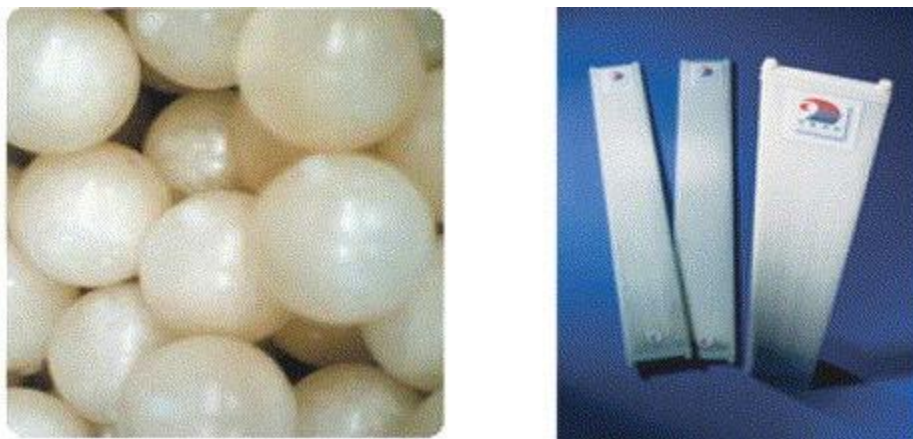


Figura A-8 Cápsulas esféricas de poliolefina y paneles de polipropileno [11]

- **Microencapsulado:** es un proceso físico-químico, que consiste en recubrir pequeñas partículas sólidas o líquidas de 1 a 1000 $\mu\text{m}$  de diámetro con una cápsula sólida, generalmente un polímero. Los **procesos físicos** que se utilizan para microencapsular son el pulverizado, centrifugado, en lecho fluido o recubrimiento como los cilindros de laminación. Los **procesos químicos** describen encapsulados in situ como las coacervaciones (separación de fases) con gelatina, policondensaciones interfaciales para obtener poliamidas o poliuretanos, precipitaciones debidas a policondensación de amino resinas y otros. La película polimérica, de elevado peso molecular, debe ser compatible tanto con el PCM como con los materiales de construcción.

El PCM microencapsulado, tiene la ventaja de ser de fácil aplicación, tener buena transmisión térmica debido al incremento de la superficie de intercambio y no necesita protección contra la destrucción (por ejemplo las ceras de parafina microencapsuladas tienen un buen potencial como material de almacenamiento de energía). Sin embargo, puede afectar a la resistencia mecánica de la estructura. En la Figura A-9 [11] se puede ver una imagen ampliada de PCM microencapsulados

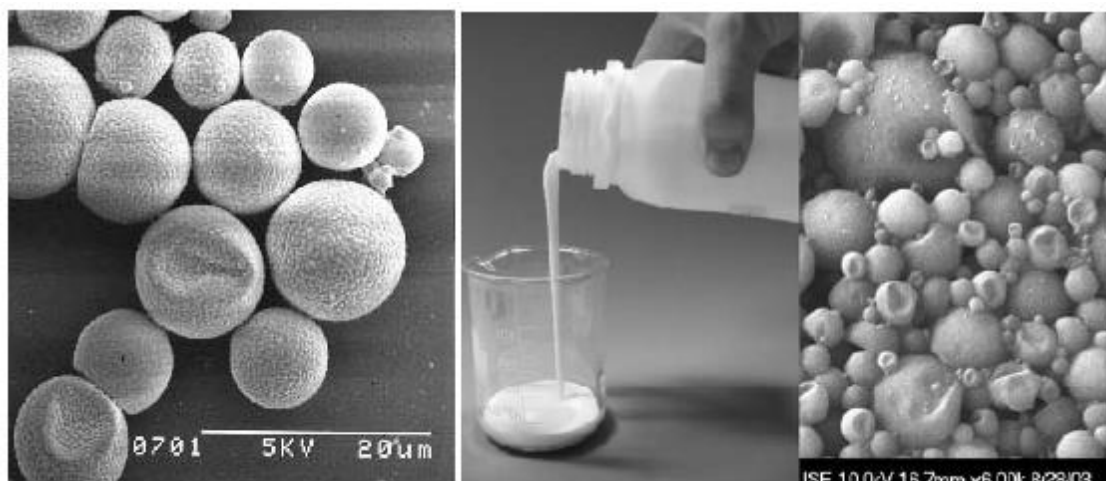


Figura A-9 A la izquierda una fotografía ampliada de PCM Microencapsulados (Deltathermal), a la derecha pasta con PCM microencapsulado (Internacional Energy Agency) [11]

La Tabla A-8 tomada de Feldman [14] describe brevemente los métodos de aplicación de PCM anteriormente mencionados.

**Tabla A-8 Sistemas de incorporación de PCM [14]**

<b>Método de incorporación</b>	<b>Método utilizado</b>	
	Placas (e<12.7mm)	Bloques de hormigón (H>200; H=200; H=100mm)
<b>Incorporación directa (con la mezcla)</b>	Añadir líquido al PCM para mezclar	Añadir PCM pulverizado / Añadir pequeños cilindros a la mezcla / Añadir agregado ya impregnado a la mezcla
<b>Inmersión</b>	Sumergir el tablero en PCM líquido a 80 °C durante varios minutos	Sumergir el bloque en PCM líquido a 80 °C durante el tiempo necesario
<b>Encapsulado</b>	Microencapsulado	Micro y Macroencapsulado

## ANEXO B: Definición del sistema objeto de estudio

### Trabajos experimentales en distintos elementos constructivos

#### PCM EN PANELES DE YESO

Se ha estudiado la incorporación directa del PCM líquido o en polvo, añadiéndolo y mezclándolo con el yeso durante su producción.

La Tabla B-1 expone las principales características térmicas de algunos PCM considerados por Feldman [14] como los más adecuados para la incorporación en yeso.

Tabla B-1 Características térmicas de varias combinaciones PCM - yeso

PCM	$T_f$ (°C)	$T_{\text{solidificación}}$ (°C)	$Q_{\text{lat yeso +PCM}}$ (kJ/kg)
<b>45/55 Ácido cáprico-láurico</b>	17	21	28
<b>Butil estearato</b>	18	21	30
<b>Propil palmitato</b>	19	16	40
<b>Dodecanol</b>	20	21	17

Un ejemplo es un tablero de yeso producido en laboratorio por incorporación directa del 21-22% de butil estearato (BS) a los ingredientes convencionales de la mezcla de los paneles de yeso, disponibles comercialmente.

A continuación se resumen algunos de los numerosos trabajos experimentales realizados por diferentes autores:

Feldman [14] realizó diferentes experimentos y consideraron los paneles de yeso compatibles con gran variedad de PCM incluyendo ácidos grasos y ésteres. Sometieron los paneles de yeso con PCM a varios cientos de ciclos térmicos durante los cuales los tableros se cubrieron con pinturas, adhesivos y papel pintado convencionales. Se analizaron las emisiones volátiles, desprendimiento de gases y fugas y llegaron a los siguientes resultados:

- Sus propiedades mecánicas (capacidad de flexión), no se vieron afectadas.
- Funcionaban mejor higrotérmicamente, absorbieron menos de la tercera parte de humedad que los convencionales.
- Su capacidad de almacenamiento térmico fue once veces superior al de uno convencional, para un cambio de temperatura de 4 °C.
- La cantidad más adecuada de PCM (BS) fue 25% en peso.
- No se produjo un desprendimiento significativo de gases.
- Las emisiones volátiles no fueron diferentes de las muestras sin PCM.
- Impregnados con retardador de llama, se evitó su inflamabilidad y combustibilidad.
- No hubo fugas en estado líquido.
- Su durabilidad se consideró satisfactoria.
- Salvo en las muestras muy porosas, las pérdidas de PCM durante los ciclos fue despreciable.

Posteriormente Athienitis y col. [68] desarrollaron un estudio con ensayo sobre un modelo a escala real, con tableros de yeso con PCM (BS). Los tableros de yeso que utilizaron contenían aproximadamente el 25% en peso de BS. Se desarrolló un método de diferencias finitas para simular el proceso de transferencia térmica en los muros. Se demostró que la utilización de los tableros de PCM y yeso podría reducir alrededor de 4°C la



temperatura durante el día, evitando así el sobrecalentamiento del local, así como reducir la carga térmica nocturna de manera significativa.

A. Oliver [13] expone como el Fraunhofer Institute, trabajando junto con BASF en el desarrollo de un elemento constructivo de yeso laminado con PCM, han realizado pruebas de comportamiento de diferentes tipos de muros constructivos incorporando diferentes cantidades de PCM, en habitaciones idénticas. Analizaron el efecto de la incorporación de los PCM en función del rango de temperatura de cambio de fase, la proporción de PCM y la estructura y uso del edificio. Uno de los tableros, que contenía una capa de 6 mm del PCM, no superaba los 27 °C, mientras que la habitación sin PCM alcanzaba 31 °C. De ello se deduce que a mayor cantidad de PCM mayor duración del proceso de enfriamiento. Así en un cierto rango de temperatura, la masa térmica del edificio puede aumentarse significativamente por el proceso de cambio de fase

Ibáñez [69] en 2005 evaluaron la influencia de los cerramientos con PCM en todo el balance energético de un edificio. Calcularon los costes de producción de los paneles con PCM. Para obtener los mejores resultados debían seguirse las siguientes recomendaciones.

- Los PCM deberían incluirse en una localización específica (en el caso de la aplicación del PCM en el techo y en el cerramiento oeste de la habitación prototipo).
- La capacidad de almacenamiento necesaria de los paneles para reducir suficientemente la máxima temperatura de aire está sobre 15000 y 37500 kJ/m<sup>3</sup>.
- El PCM elegido para las condiciones climáticas y el diseño de estas aplicaciones deberían tener una temperatura de cambio de fase entre 25 y 27.5 °C.

Con estas consideraciones, se podía obtener un descenso de la temperatura ambiente superior a 3°C. A pesar de esto, las ventajas del almacenamiento obtenido están limitadas por los bajos coeficientes de transmisión de calor por convección entre el aire de la habitación y la superficie del panel.

Esto significa que aunque se consigan elevados porcentajes de PCM, éstos no se cargan y descargan completamente durante el periodo comprendido en un día. La otra desventaja es un olor desagradable en el panel y en el aire de la habitación después de que el panel haya sido impregnado con el PCM. Feldman y col. [70] también revelaron este problema. Pruebas realizadas sobre las muestras, mostraron que la mayor parte del olor se eliminaba cuando el tablero con PCM se calentaba en un horno a 93°C durante varias horas.

Otro problema adicional advertido por Rudd [71], fue que debido a la vaporización de las impurezas de los ácidos grasos del tablero de PCM, muchas superficies metálicas incluyendo cobre y aluminio, generaban una capa de corrosión. Se considera que este problema es solucionable debido a que las impurezas volátiles en los ácidos grasos pueden evaporarse antes de tratar el panel.

Khudhair y col. [29] han investigado también el comportamiento térmico de un tablero de yeso incorporando PCM. Sus experimentos mostraron que la impregnación se llevaba a cabo simplemente sumergiendo muestras de paneles en PCM fundido durante varios minutos. Dos ejemplos o láminas de tablero (100x100x10mm) impregnado con parafina (23.2% peso de RT20) y Butil estearato (22 % peso de BS) se probaron para conocer su estabilidad física y térmica respecto a un panel de referencia (sin PCM). El ciclo térmico se consiguió impulsando aire caliente y frío a través del mismo lado del tablero. Las pruebas de ciclos térmicos para los dos tipos de PCM señalados arriba, mostraron que no había tendencia a la fuga de material en el tablero, y no se observó deterioro en la capacidad de almacenamiento térmico del panel.

Pomianowski en 2013 [24] describe en una extensa revisión, un experimento realizado con placas de yeso laminado con PCM parafina microencapsulada y macroencapsulada a escala real. Los autores señalaron que

el PCM microencapsulado tiene la ventaja de una aplicación más fácil y no tiene el peligro de fuga como con los PCM macroencapsulados.

Durante los últimos años, se han realizado numerosos estudios experimentales sobre yeso con PCM tanto en incorporación directa como con PCM en forma de tablero. Se obtiene de los estudios que los materiales de yeso se pueden combinar directamente con hasta un 45% en peso de PCM reforzando la estructura con algunos aditivos y hasta un 60% en peso para tableros PCM [13, 24, 39].

Existen algunos inconvenientes en la incorporación de PCM al yeso que es necesario tener en cuenta. La transmisión de temperatura para una región climática no es adecuada para otra. Por ejemplo, buscar la temperatura adecuada es más complicado en zonas donde se requiere tanto calefacción como refrigeración. Otras consideraciones incluyen el depósito de impurezas volátiles, retardantes de fuego, corrosión de metales, olor y otros aspectos más convencionales como la posibilidad de pintar. También es necesario considerar la relación de superficie de PCM de yeso con el área de superficie interna de la habitación y el contenido en porcentaje de PCM en el yeso [13].

### **PCM EN HORMIGÓN**

El hormigón es un material muy utilizado en edificación y tiene una alta participación en el peso total de los edificios por lo que el estudio de la incorporación de PCM en hormigón puede resultar adecuado para la reducción de los picos de temperatura en los edificios. Muestra de ello es la gran cantidad de investigaciones que se realizan en este aspecto [72, 73]. En el caso de los bloques de hormigón, tanto la inmersión como la incorporación directa son formas prácticas de incorporar PCM. La combinación de PCM en materiales como el cemento o el hormigón aumenta el almacenamiento de calor de materiales de construcción pesados. Se combinan la alta capacidad de calor latente del PCM y la alta densidad de hormigón y la consecuencia es un ahorro de energía en los edificios tanto de calefacción como de refrigeración.

La compatibilidad de los bloques de hormigón depende básicamente de la presencia de hidróxido de calcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) en los bloques, ya que ciertos PCM orgánicos pueden reaccionar con él.

Lee y col. [72] en 1983 investigaron la capacidad de almacenamiento de calor de un bloque de hormigón impregnado con PCM. En este estudio, se evaluó el comportamiento de almacenamiento térmico de un bloque de hormigón convencional y otro impregnado con dos tipos diferentes de PCM. Uno es butil estearato (BS) disponible comercialmente (Emerser 2326) y el otro es una parafina comercial (P) (Unicer 55). En el experimento se utilizaron bloques de hormigón de dimensiones 20×20×40 cm con un núcleo hueco. Compararon entre dos tipos de bloques: normales (N), y en autoclave (A). La impregnación de los bloques de hormigón con el PCM se logró mediante la inmersión de cada bloque en un baño lleno de PCM líquido a una temperatura constante. Los bloques se calentaron a la temperatura apropiada y se sumergieron hasta que se absorbió la cantidad precisada del PCM. Los bloques ensayados tenían la siguiente cantidad de PCM (% en peso):

- 5.6% para el bloque en autoclave impregnado con BS (ABS)
- 8.6% para el bloque en autoclave impregnado con P (AP)
- 3.9% para el bloque normal impregnado con P (NP)

La Tabla B-2 [72], representa los valores de almacenamiento de calor y de rendimiento de las diferentes combinaciones de PCM-bloque de hormigón examinadas en el estudio.

Tabla B-2 Resultados de rendimiento en la impregnación de PCM en hormigón

Tipo de bloque	A	A	A	N	N
PCM	BS	P	P	P	P
% PCM en el bloque	5.6	8.4	8.4	3.9	3.9
Rango de temperatura (°C)	15-25	22-60	45-60	22-60	45-60
Calor sensible en bloques (kJ)	1428	5337	2107	7451	2941
Calor sensible en PCM (kJ)	233	1136	449	705	278
Calor latente en PCM (kJ)	977	2771	2082	1718	1291
Calor almacenable total (kJ)	2638	9244	4638	9874	4510
Calor almacenable Total / Calor sensible almacenable en el bloque	1.9	1.7	2.2	1.3	1.5

Se observó que si se impregna con la suficiente cantidad de PCM, la capacidad de almacenamiento aumenta más del doble.

Otros estudios sobre incorporación de PCM en bloques de hormigón como el realizado por Hawes [73], en 1984 mostró un incremento del almacenamiento térmico por encima del 300% con técnicas de incorporación de PCM mejoradas. Hadjieva, Stoykov y col. [74], en 2000 investigaron la capacidad de almacenamiento térmico y estabilidad estructural en ciclos térmicos múltiples de compuestos de hormigón con PCM consistente en tiosulfato de sodio pentahidrato ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ) impregnado en hormigón. La gran superficie de absorción de hormigón poroso en autoclave mejora su estabilidad estructural durante el ciclo térmico. Los resultados obtenidos experimentalmente con este microencapsulado confirman la adaptabilidad del PCM en el almacenamiento térmico en muros, ya que evita problemas de sobreenfriamiento y segregación.

#### PCM EN AISLAMIENTO TRANSPARENTE

Uno de los sistemas sobre los que se está estudiando la posible aplicación de los PCM en edificación es un sistema de muro externo compuesto por un material aislante transparente (TIM, Transparent Insulation Material) y un PCM translúcido. Ya en 1997 Manz y col. [75], trabajaron sobre un sistema pasivo formado por un vidrio de doble hoja entre las que se instala el PCM. Este sistema se considera un posible candidato para almacenamiento térmico. Parte de la radiación solar incidente se transmite al interior de la habitación para iluminarla. Cuando el material de almacenamiento está a baja temperatura, el PCM está en estado sólido cristalino, por lo que la luz que se transmite al interior de la habitación es difusa debida al proceso de difracción. Esta energía solar almacenada puede utilizarse para calentar los espacios interiores por convección y radiación. Para evitar sobrecalentamiento en verano Manz y col. [75] utilizaron una persiana enrollable exterior con alto índice de reflexión y la misma persiana puede utilizarse para evitar pérdidas de calor por las noches. El PCM utilizado en este sistema fue  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  cloruro de calcio hexahidratado, disponible comercialmente con un 5% en peso de aditivos. El principal problema de este sistema es que durante el estado sólido del PCM se reduce la iluminación, y debido a la reflexión de la radiación solar también se reducen las ganancias térmicas. El dispositivo creado para la investigación se muestra en la Figura B-1 y Figura B-2 [75].

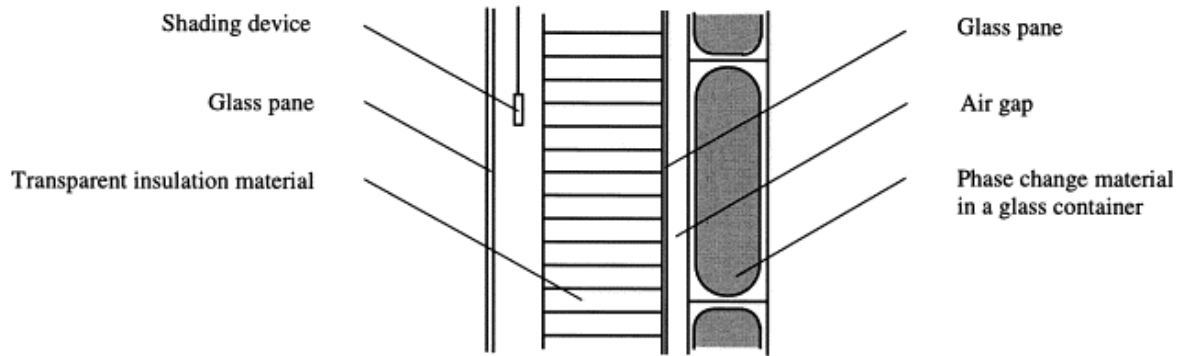


Figura B-1 Prototipo de sistema de muro externo TIM-PCM para almacenamiento de energía solar [75]



Figura B-2 Pared prototipo vista desde el interior de la habitación [75]

Otra aplicación como muro transparente fue desarrollada por Stritih en 2003 [76]. Éste contenía parafina negra como material almacenador. El calor almacenado se utilizó para calentar y ventilar una vivienda. El muro consistía en seis elementos principales, tal como se muestran en la Figura B-3 [76].

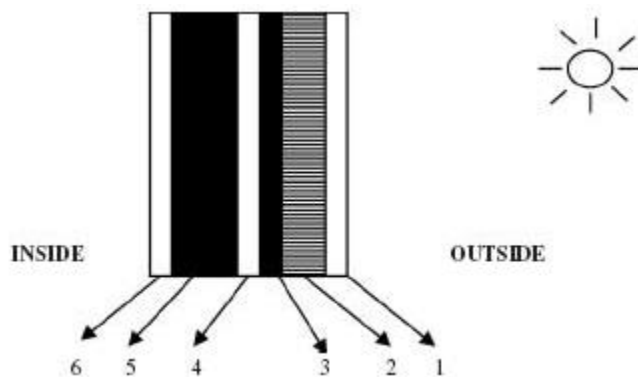


Figura B-3 Elementos de un muro solar con PCM. La radiación solar de onda corta pasa a través del vidrio con material aislante transparente (TIM) (1,2) que evita la transmisión de calor por convección y radiación térmica. El PCM (3) encapsulado en policarbonato, absorbe y almacena energía en forma de calor latente. El aire de ventilación de la casa se calienta en el conductor de aire (4) y se conduce a la habitación. Aislamiento (5) y enlucido (6) son materiales convencionales [76]

Este muro solar tiene algunas ventajas frente a otros sistemas, como son: la elevada eficiencia en la conversión de la energía solar en forma de calor latente, debido a la absorción de la radiación solar directamente en la parafina a través del vidrio transparente a la vez de que el aislamiento evita las pérdidas por convección y radiación y por otra parte se ha visto que las pérdidas por conducción de la habitación en la pared solar disminuyen [11].

Weinläder y col. en 2005 [77], investigaron las propiedades del doble acristalamiento combinado con PCM. Comparando con un doble acristalamiento convencional, las pérdidas energéticas en la fachada sur eran del 30%. Las ganancias solares se redujeron en un 50%.

Estos paneles transmiten suficiente luz, para que puedan ser utilizados como elementos de iluminación natural. Comparando con un doble acristalamiento convencional logran ganancias de calor moderadas con muy pocas pérdidas de calor. Debido a esto, dichos sistemas pueden ser una buena opción para los edificios.

El principal problema de estos sistemas transparentes es la solidificación del PCM. Visualmente no es estético y puede detraer a los arquitectos o diseñadores de los edificios. Este pequeño problema estético se puede solucionar a través de medidas que ocultan el PCM como acristalamientos traslúcidos en lugar de transparentes, como complemento de las ventanas convencionales instalándolo en lugares donde no se necesite contacto visual con el medio exterior. Proporcionaría una iluminación homogénea y rendimiento térmico con muy bajas pérdidas de calor [11].

En la Figura B-4 [77].se puede observar en la parte superior de la ventana, las diferentes fases del proceso de cristalización de S27 (PCM comercial compuesto principalmente de  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ). El material solidifica en forma de agujas de cristal que siguen creciendo hasta que cristaliza todo el PCM.

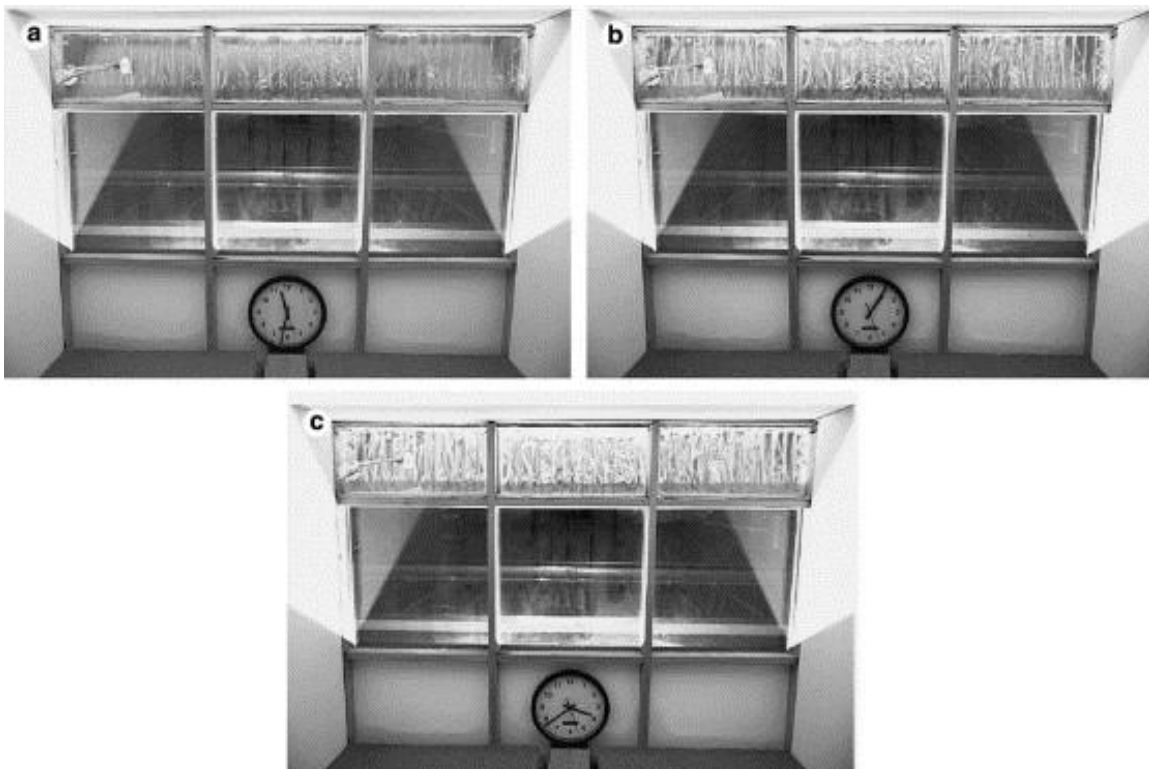


Figura B-4 Proceso de cristalización de S27 en acristalamiento (parte superior de la ventana) [77]

Ismail y col. en 2001 [78] estudiaron la viabilidad y eficacia térmica de una ventana compuesta de doble hoja de vidrio con PCM en una cámara interior. En la Figura B-5 [78] se muestra el sistema propuesto. La ventana tiene una salida de aire en la parte superior. Los laterales y la parte inferior están sellados excepto por dos

agujeros en la parte inferior, que están conectados por un tubo de plástico a una bomba y a un tanque que contiene el PCM en la fase líquida. Mediante un sensor de temperaturas se bombea el PCM líquido hacia la cámara colocada entre el vidrio donde se solidifica éste formando una capa sólida que con el tiempo va aumentando de grosor y evita por absorción de calor que la temperatura interna disminuya.

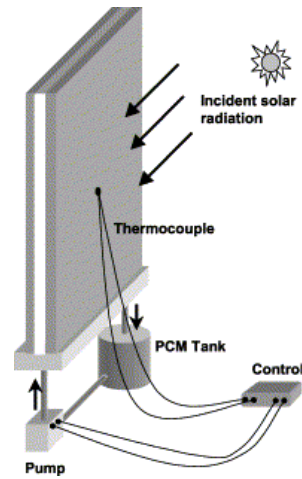


Figura B-5 Ventana con cortina móvil [78]

Los autores concluyen que el sistema de doble ventana rellena de PCM es más eficaz que la misma ventana llena de aire, y que este sistema además ayuda a filtrar la radiación térmica y reducir las ganancias o pérdidas puesto que la mayoría de energía transferida se absorbe durante el cambio de fase del PCM [78].

## ANEXO C: Análisis de resultados

### Inventario de ciclo de vida

A continuación se encuentra desglosado en la Tabla C-1, Tabla C-2 y Tabla C-3, el Inventario de materiales y consumo de energía en fase de uso, empleado para la realización del ICV. En la última columna de cada tabla se puede observar el ahorro energético de la utilización de PCM con respecto al caso sin PCM.

Tabla C-1 ICV Hormigón

Hormigón Parafina comercial - 10000 ciclos – 27.4 años de vida útil									
Materiales	Superficie total habitación (m <sup>2</sup> )	Superficie /m <sup>2</sup> soluc constructiva (Ud. Funcional)	Volumen (m <sup>3</sup> )	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	kg material 50 años	Consumo energía (kWh/año)	Consumo energía/m <sup>2</sup> PCM (kWh/m <sup>2</sup> ) 1 año	Consumo energía/m <sup>2</sup> PCM (kWh/m <sup>2</sup> ) 50 años	Ahorro de energía respecto sin PCM(%)
PCM Parafina comercial 10mm	37.74	1	0.01	750	7.50	2186.8	57.94	2937.21	1.62
Hormigón forjado 140mm	37.74	1	0.14	1330	186.20				
Lana mineral 20mm	37.74	1	0.02	40	0.80				
LH cerámico hueco doble 70mm	37.74	1	0.07	930	65.10				
Mortero 15mm	37.74	1	0.015	1900	28.50				
Vidrio 6mm	3.78	0.10	0.0006	2710	1.63				
Puerta roble 25mm	1.68	0.044	0.001	700	0.78				
Hormigón Heptadecano - 5000 ciclos – 13.7 años de vida útil									
Materiales	Superficie total habitación (m <sup>2</sup> )	Superficie /m <sup>2</sup> soluc constructiva (Ud. Funcional)	Volumen (m <sup>3</sup> )	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	kg material 50 años	Consumo energía (kWh/año)	Consumo energía/m <sup>2</sup> PCM (kWh/m <sup>2</sup> ) 1 año	Consumo energía/m <sup>2</sup> PCM (kWh/m <sup>2</sup> ) 50 años	Ahorro de energía respecto sin PCM(%)
PCM Heptadecano 10mm	37.74	1	0.01	850	8.50	2174.33	57.61	2956.94	0.96
Hormigón forjado 140mm	37.74	1	0.14	1330	186.20				
Lana mineral 20mm	37.74	1	0.02	40	0.80				
LH cerámico hueco doble 70mm	37.74	1	0.07	930	65.10				
Mortero 15mm	37.74	1	0.015	1900	28.50				
Vidrio 6mm	3.78	0.10	0.0006	2710	1.63				
Puerta roble 25mm	1.68	0.044	0.001	700	0.78				

Hormigón CaCl <sub>2</sub> - 5650 ciclos – 15.5 años de vida útil									
Materiales	Superficie total habitación (m <sup>2</sup> )	Superficie /m <sup>2</sup> soluc constructiva (Ud. Funcional)	Volumen (m <sup>3</sup> )	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	kg material 50 años	Consumo energía (kWh/año)	Consumo energía/m <sup>2</sup> PCM (kWh/m <sup>2</sup> ) 1 año	Consumo energía/m <sup>2</sup> PCM (kWh/m <sup>2</sup> ) 50 años	Ahorro de energía respecto sin PCM(%)
PCM CaCl <sub>2</sub> 6H <sub>2</sub> O 10mm	37.74	1	0.01	1600	16.00				
Hormigón forjado 140mm	37.74	1	0.14	1330	186.20				
Lana mineral 20mm	37.74	1	0.02	40	0.80				
LH cerámico hueco doble 70mm	37.74	1	0.07	930	65.10				
Mortero 15mm	37.74	1	0.015	1900	28.50				
Vidrio 6mm	3.78	0.10	0.0006	2710	1.63				
Puerta roble 25mm	1.68	0.044	0.001	700	0.78	2225.68	58.97	2974.24	0.38

Hormigón Cáprico Mirístico (Eutéctico) - 5000 ciclos – 13.7 años de vida útil									
Materiales	Superficie total habitación (m <sup>2</sup> )	Superficie /m <sup>2</sup> soluc constructiva (Ud. Funcional)	Volumen (m <sup>3</sup> )	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	kg material 50 años	Consumo energía (kWh/año)	Consumo energía/m <sup>2</sup> PCM (kWh/m <sup>2</sup> ) 1 año	Consumo energía/m <sup>2</sup> PCM (kWh/m <sup>2</sup> ) 50 años	Ahorro de energía respecto sin PCM(%)
PCM Cáprico Mirístico	37.74	1	0.01	879	8.79				
Hormigón forjado 140mm	37.74	1	0.14	1330	186.20				
Lana mineral 20mm	37.74	1	0.02	40	0.80				
LH cerámico hueco doble 70mm	37.74	1	0.07	930	65.10				
Mortero 15mm	37.74	1	0.015	1900	28.50				
Vidrio 6mm	3.78	0.10	0.0006	2710	1.63				
Puerta roble 25mm	1.68	0.044	0.001	700	0.78	2166.02	57.39	2953.92	1.07%



HORMIGON SIN PCM									
Material	Superficie total habitación (m <sup>2</sup> )	Superficie /m <sup>2</sup> soluc constructiva (Ud. Funcional)	Volumen (m <sup>3</sup> )	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	kg material 50 años	Consumo energía (kWh/año)	Consumo energía/m <sup>2</sup> PCM (kWh/m <sup>2</sup> ) 1 año	Consumo energía/m <sup>2</sup> PCM (kWh/m <sup>2</sup> ) 50 años	Ahorro de energía respecto sin PCM(%)
Hormigón forjado 140mm	37.74	1	0.14	1330	186.20	2253.62	59.71	2985.72	0.00
Lana mineral 20mm	37.74	1	0.02	40	0.80				
LH cerámico hueco doble 70mm	37.74	1	0.07	930	65.10				
Mortero 15mm	37.74	1	0.015	1900	28.50				
Vidrio 6mm	3.78	0.10	0.0006	2710	1.63				
Puerta roble 25mm	1.68	0.044	0.001	700	0.78				

Tabla C-2 ICV Yeso

Yeso Parafina comercial 10000 ciclos - 1.825 reemplazos de material									
Material	Superficie total habitación (m <sup>2</sup> )	Superficie /m <sup>2</sup> soluc constructiva (Ud. Funcional)	Volumen (m <sup>3</sup> )	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Superficie /m <sup>2</sup> soluc constructiva 50 años	kg material 50 años	Consumo energía (kWh) 1 año	Consumo energía/m <sup>2</sup> sol. constr. (kWh/m <sup>2</sup> ) 50 años	Ahorro de energía /respecto sin PCM (%)
PCM Parafina comercial 10mm	37.74	1	0.01	750	1.825	13.68	2125.36	2815.79	3.39
LP perforado 115mm	37.74	1	0.115	1020	1	117.3			
Lana mineral 20mm	37.74	1	0.02	40	1	0.8			
LH cerámico hueco doble 70mm	37.74	1	0.07	930	1	65.1			
Mortero 15mm	37.74	1	0.015	1900	1	28.5			
Yeso 20mm	37.74	1	0.02	1150	1.825	41.97			
Vidrio 6mm	3.78	0.10	0.0006	2710	0.10	1.62			
Puerta roble 25mm	1.68	0.044	0.001	700	0.04	0.77			

Yeso Heptadecano - 5000 ciclos - 3.65 reemplazos de material									
Materiales	Superficie total habitación (m <sup>2</sup> )	Superficie /m <sup>2</sup> soluc constructiva (Ud. Funcional)	Volumen (m <sup>3</sup> )	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Superficie /m <sup>2</sup> soluc constructiva 50 años	kg material 50 años	Consumo energía (kWh) 1 año	Consumo energía/m <sup>2</sup> sol. constr. (kWh/m <sup>2</sup> ) 50 años	Ahorro de energía /respecto sin PCM (%)
PCM Heptadecano	37.74	1	0.01	850	3.65	31.025			
LP perforado 115mm	37.74	1	0.115	1020	1	117.3			
Lana mineral 20mm	37.74	1	0.02	40	1	0.8			
LH cerámico hueco doble 70mm	37.74	1	0.07	930	1	65.1			
Mortero 15mm	37.74	1	0.015	1900	1	28.5			
Yeso 20mm	37.74	1	0.02	1150	3.65	83.95			
Vidrio 6mm	3.78	0.10	0.0006	2710	0.10	1.62			
Puerta roble 25mm	1.68	0.044	0.042	700	0.04	29.4	2122.16	2811.55	3.54

Yeso CaCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O - 5650 ciclos - 3.23 reemplazos de material									
Materiales	Superficie total habitación (m <sup>2</sup> )	Superficie /m <sup>2</sup> soluc constructiva (Ud. Funcional)	Volumen (m <sup>3</sup> )	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Superficie /m <sup>2</sup> soluc constructiva 50 años	kg material 50 años	Consumo energía (kWh) 1 año	Consumo energía/m <sup>2</sup> sol. constr. (kWh/m <sup>2</sup> ) 50 años	Ahorro de energía /respecto sin PCM (%)
PCM CaCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	37.74	1	0.01	1600	3.23	51.62			
LP perforado 115mm	37.74	1	0.12	1020	1.00	117.30			
Lana mineral 20mm	37.74	1	0.02	40	1.00	0.80			
LH cerámico hueco doble 70mm	37.74	1	0.07	930	1.00	65.10			
Mortero 15mm	37.74	1	0.02	1900	1.00	28.50			
Yeso 20mm	37.74	1	0.02	1150	3.23	74.20			
Vidrio 6mm	3.78	0.10	0.00	2710	0.10	1.63			
Puerta roble 25mm	1.68	0.044	0.04	700	0.04	29.40	2174.36	2880.71	1.17

Yeso Cáprico Mirístico (Eutético) - 5000 ciclos - 3.65 reemplazos de material									
Materiales	Superficie total habitación (m <sup>2</sup> )	Superficie /m <sup>2</sup> soluc constructiva (Ud. Funcional)	Volumen (m <sup>3</sup> )	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Superficie /m <sup>2</sup> soluc constructiva 50 años	kg material 50 años	Consumo energía (kWh) 1 año	Consumo energía/m <sup>2</sup> sol. constr. (kWh/m <sup>2</sup> ) 50 años	Ahorro de energía /respecto sin PCM (%)
PCM Cáprico Mirístico	37.74	1	0.01	879	3.65	32.08	2107.7	2792.39	4.20
LP perforado 115mm	37.74	1	0.12	1020	1	117.3			
Lana mineral 20mm	37.74	1	0.02	40	1	0.8			
LH cerámico hueco doble 70mm	37.74	1	0.07	930	1	65.1			
Mortero 15mm	37.74	1	0.02	1900	1	28.5			
Yeso 20mm	37.74	1	0.02	1150	3.65	83.95			
Vidrio 6mm	3.78	0.10	0.00	2710	0.10	1.62			
Puerta roble 25mm	1.68	0.044	0.04	700	0.04	29.4			

YESO SIN PCM									
Materiales	Superficie total habitación (m <sup>2</sup> )	Superficie /m <sup>2</sup> soluc constructiva (Ud. Funcional)	Volumen (m <sup>3</sup> )	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Superficie /m <sup>2</sup> soluc constructiva 50 años	kg material 50 años	Consumo energía (kWh) 1 año	Consumo energía/m <sup>2</sup> sol. constr. (kWh/m <sup>2</sup> ) 50 años	Ahorro de energía /respecto sin PCM (%)
LP perforado 115mm	37.74	1	0.12	1020	1	117.3	2199.99	2914.66	0.00
Lana mineral 20mm	37.74	1	0.02	40	1	0.8			
LH cerámico hueco doble 70mm	37.74	1	0.07	930	1	65.1			
Mortero 15mm	37.74	1	0.02	1900	1	28.5			
Yeso 20mm	37.74	1	0.02	1150	1	23			
Vidrio 6mm	3.78	0.10	0.00	2710	0.10	1.62			
Puerta roble 25mm	1.68	0.044	0.04	700	0.04	29.4			

Tabla C-3 ICV Yeso

Vidrio Parafina comercial 10000 ciclos - 1.825 reemplazos de material									
Material	Superficie total habitación (m <sup>2</sup> )	Superficie /m <sup>2</sup> solución constructiva (Ud. Funcional)	Volumen (m <sup>3</sup> )	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	kg material 50 años	Superficie /m <sup>2</sup> soluc constructiva 50 años	Consumo energía (kWh) 1 año	Consumo energía/m <sup>2</sup> sol. constr. (kWh/m <sup>2</sup> ) 50 años	Ahorro de energía respecto sin PCM (%)
PCM Parafina comercial 10mm	37.74	1	0.01	750	13.69	1.83	6353.92	8418.02	9.09
LP perforado 115mm	3.78	0.1	0.01	1020	11.75	0.10			
Lana mineral 20mm	3.78	0.1	0.00	40	0.08	0.10			
LH cerámico hueco doble 70mm	3.78	0.1	0.01	930	6.52	0.10			
Mortero 15mm	3.78	0.1	0.00	1900	2.85	0.10			
Yeso 20mm	3.78	0.1	0.00	1150	2.30	0.10			
Vidrio 6mm	37.74	1	0.01	2710	29.67	1.83			
Puerta roble 25mm	1.68	0.04	0.00	700	0.78	0.04			

Vidrio Heptadecano - 5000 ciclos - 3.65 reemplazos de material									
Material	Superficie total habitación (m <sup>2</sup> )	Superficie /m <sup>2</sup> solución constructiva (Ud. Funcional)	Volumen (m <sup>3</sup> )	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	kg material 50 años	Superficie /m <sup>2</sup> soluc constructiva 50 años	Consumo energía (kWh) 1 año	Consumo energía/m <sup>2</sup> sol. constr. (kWh/m <sup>2</sup> ) 50 años	Ahorro de energía respecto sin PCM (%)
PCM Heptadecano 10mm	37.74	1	0.01	850.00	31.03	3.65	6237.45	8263.71	10.76
LP perforado 115mm	3.78	0.1	0.01	1020.00	11.75	0.10			
Lana mineral 20mm	3.78	0.1	0.00	40.00	0.08	0.10			
LH cerámico hueco doble 70mm	3.78	0.1	0.01	930.00	6.52	0.10			
Mortero 15mm	3.78	0.1	0.00	1900.00	2.85	0.10			
Yeso 20mm	3.78	0.1	0.00	1150.00	2.30	0.10			
Vidrio 6mm	37.74	1	0.01	2710.00	59.35	3.65			
Puerta roble 25mm	1.68	0.04	0.00	700.00	0.78	0.04			

Vidrio CaCl <sub>2</sub> - 5650 ciclos – 3.23 reemplazos de material									
Materiales	Superficie total habitación (m <sup>2</sup> )	Superficie /m <sup>2</sup> solución constructiva (Ud. Funcional)	Volumen (m <sup>3</sup> )	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	kg material 50 años	Superficie /m <sup>2</sup> soluc constructiva 50 años	Consumo energía (kWh) 1 año	Consumo energía/m <sup>2</sup> sol. constr. (kWh/m <sup>2</sup> ) 50 años	Ahorro de energía respecto sin PCM (%)
PCM CaCl <sub>2</sub> 6H <sub>2</sub> O 10mm	37.74	1	0.01	1600.00	51.62	3.23	6270.45	8307.43	10.28
LP perforado 115mm	3.78	0.1	0.01	1020.00	11.75	0.10			
Lana mineral 20mm	3.78	0.1	0.00	40.00	0.08	0.10			
LH cerámico hueco doble 70mm	3.78	0.1	0.01	930.00	6.52	0.10			
Mortero 15mm	3.78	0.1	0.00	1900.00	2.85	0.10			
Yeso 20mm	3.78	0.1	0.00	1150.00	2.30	0.10			
Vidrio 6mm	37.74	1	0.01	2710.00	52.45	3.23			
Puerta roble 25mm	1.68	0.04	0.00	700.00	0.78	0.04			

Vidrio Cáprico Mirístico (Eutéctico) - 5000 ciclos - 3.65 reemplazos de material									
Materiales	Superficie total habitación (m <sup>2</sup> )	Superficie /m <sup>2</sup> solución constructiva (Ud. Funcional)	Volumen (m <sup>3</sup> )	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	kg material 50 años	Superficie /m <sup>2</sup> soluc constructiva 50 años	Consumo energía (kWh) 1 año	Consumo energía/m <sup>2</sup> sol. constr. (kWh/m <sup>2</sup> ) 50 años	Ahorro de energía respecto sin PCM (%)
PCM Cáprico Mirístico 10mm	37.74	1	0.01	879.00	32.08	3.65	6376.65	8448.13	8.76
LP perforado 115mm	3.78	0.1	0.01	1020.00	11.75	0.10			
Lana mineral 20mm	3.78	0.1	0.00	40.00	0.08	0.10			
LH cerámico hueco doble 70mm	3.78	0.1	0.01	930.00	6.52	0.10			
Mortero 15mm	3.78	0.1	0.00	1900.00	2.85	0.10			
Yeso 20mm	3.78	0.1	0.00	1150.00	2.30	0.10			
Vidrio 6mm	37.74	1	0.01	2710.00	59.35	3.65			
Puerta roble 25mm	1.68	0.04	0.00	700.00	0.78	0.04			

VIDRIO SIN PCM									
Material	Superficie total habitación (m <sup>2</sup> )	Superficie /m <sup>2</sup> solución constructiva (Ud. Funcional)	Volumen (m <sup>3</sup> )	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	kg material 50 años	Superficie /m <sup>2</sup> soluc constructiva 50 años	Consumo energía (kWh) 1 año	Consumo energía/m <sup>2</sup> sol. constr. (kWh/m <sup>2</sup> ) 50 años	Ahorro de energía respecto sin PCM (%)
LP perforado 115mm	3.78	0.1	0.01	1020.00	11.75	0.10	6989.25	9259.74	0.00%
Lana mineral 20mm	3.78	0.1	0.00	40.00	0.08	0.10			
LH cerámico hueco doble 70mm	3.78	0.1	0.01	930.00	6.52	0.10			
Mortero 15mm	3.78	0.1	0.00	1900.00	2.85	0.10			
Yeso 20mm	3.78	0.1	0.00	1150.00	2.30	0.10			
Vidrio 6mm	37.74	1	0.01	2710.00	29.67	1.83			
Puerta roble 25mm	1.68	0.04	0.00	700.00	0.78	0.04			

## Impacto ambiental mediante LCA para los diferentes casos de estudio

Se amplía en este apartado los resultados obtenidos en los impactos ambientales, debidos a la utilización del PCM. Datos tomados de la herramienta SIMAPRO. Se puede observar en la Tabla C-4, Tabla C-5 y Tabla C-6 los resultados obtenidos en las categorías de impacto midpoint analizadas mediante RECIPE. Los datos mostrados son globales sumando el impacto que alcanza la fabricación de los materiales, el consumo de energía en fase de uso y la disposición final de los materiales.

Tabla C-4 Impacto ambiental en los casos de estudio para el Yeso

Yeso	Unidad	M+CE+E F Y	M+CE+EF YP	M+CE+EF YH	M+CE+EF YC	M+CE+EF YCM
<b>Cambio climático</b>	kg CO <sub>2</sub> eq	1687.05	1670.21	1726.79	1782.85	1756.51
<b>Agotamiento del ozono</b>	kg CFC-11 eq	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>Toxicidad humana</b>	kg 1,4-DB eq	612.07	613.70	645.84	679.77	658.37
<b>Formación de oxidación fotoquímica</b>	kg NMVOC	6.31	6.20	6.33	6.47	6.55
<b>Formación de partículas de materia</b>	kg PM10 eq	3.80	3.71	3.77	3.91	3.90
<b>Radiaciones ionizantes</b>	kg U <sub>235</sub> eq	913.80	885.30	888.15	915.15	889.86
<b>Acidificación terrestre</b>	kg SO <sub>2</sub> eq	12.73	12.39	12.50	13.07	12.66
<b>Eutrofización de agua dulce</b>	kg P eq	0.66	0.64	0.64	0.68	0.65
<b>Eutrofización marina</b>	kg N eq	1.03	1.11	1.28	1.34	1.67
<b>Ecotoxicidad terrestre</b>	kg 1,4-DB eq	0.22	0.22	0.22	0.23	3.24
<b>Ecotoxicidad de agua dulce</b>	kg 1,4-DB eq	15.43	15.88	17.28	18.26	18.10
<b>Ecotoxicidad marina</b>	kg 1,4-DB eq	15.04	15.41	16.69	17.46	16.85
<b>Ocupación de suelo agrícola</b>	m <sup>2</sup> a	40.11	39.66	40.86	44.65	200.30
<b>Ocupación de suelo urbano</b>	m <sup>2</sup> a	7.76	7.75	8.10	8.58	8.80
<b>Transformación del suelo natural</b>	m <sup>2</sup>	0.23	0.22	0.23	0.23	1.49
<b>Agotamiento del agua</b>	m <sup>3</sup>	9.72	9.55	9.78	12.75	16.90
<b>Agotamiento de metales</b>	kg Fe eq	21.54	21.85	23.20	26.54	25.38
<b>Agotamiento de fósiles</b>	kg oil eq	462.45	468.51	496.95	475.00	461.20

Tabla C-5 Impacto ambiental en los casos de estudio para el Hormigón

Hormigón	Unidad	M+CE+E F H	M+CE+EF HP	M+CE+EF HH	M+CE+EF HC	M+CE+EF HCM
Cambio climático	kg CO <sub>2</sub> eq	1733.20	1718.05	1729.57	1748.87	1738.88
Agotamiento del ozono	kg CFC- 11 eq	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Toxicidad humana	kg 1,4-DB eq	642.82	639.24	643.24	655.34	647.06
Formación de oxidación fotoquímica	kg NMVOC	6.43	6.36	6.40	6.45	6.47
Formación de partículas de materia	kg PM10 eq	3.87	3.82	3.85	3.89	3.89
Radiaciones ionizantes	kg U <sub>235</sub> eq	935.24	920.57	926.74	934.12	927.91
Acidificación terrestre	kg SO <sub>2</sub> eq	13.00	12.83	12.92	13.08	12.97
Eutrofización de agua dulce	kg P eq	0.67	0.66	0.66	0.67	0.67
Eutrofización marina	kg N eq	1.16	1.18	1.18	1.21	1.29
Ecotoxicidad terrestre	kg 1,4-DB eq	0.23	0.22	0.22	0.23	1.05
Ecotoxicidad de agua dulce	kg 1,4-DB eq	16.64	16.66	16.75	17.14	16.98
Ecotoxicidad marina	kg 1,4-DB eq	16.14	16.14	16.23	16.54	16.28
Ocupación de suelo agrícola	m <sup>2</sup> a	40.87	40.43	40.66	41.88	84.37
Ocupación de suelo urbano	m <sup>2</sup> a	8.14	8.08	8.13	8.30	8.33
Transformación del suelo natural	m <sup>2</sup>	0.23	0.23	0.23	0.23	0.57
Agotamiento del agua	m <sup>3</sup>	10.17	10.07	10.14	11.07	12.10
Agotamiento de metales	kg Fe eq	23.56	23.68	23.87	24.97	24.48
Agotamiento de fósiles	kg oil eq	466.98	469.85	474.23	468.72	464.78



Tabla C-6 Impacto ambiental en los casos de estudio para el Vidrio

Vidrio	Unidad	M+CE+E F V	M+CE+EF VP	M+CE+EF VH	M+CE+EF VC	M+CE+EF VCM
Cambio climático	kg CO <sub>2</sub> eq	4835.73	4453.98	4443.55	4483.98	4578.60
Agotamiento del ozono	kg CFC- 11 eq	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Toxicidad humana	kg 1,4-DB eq	1602.99	1482.56	1482.17	1513.35	1529.48
Formación de oxidación fotoquímica	kg NMVOC	19.35	17.82	17.77	17.83	18.40
Formación de partículas de materia	kg PM10 eq	11.87	10.89	10.83	10.92	11.21
Radiaciones ionizantes	kg U <sub>235</sub> eq	2879.21	2628.64	2591.22	2608.87	2656.09
Acidificación terrestre	kg SO <sub>2</sub> eq	40.03	36.68	36.41	36.81	37.44
Eutrofización de agua dulce	kg P eq	2.05	1.88	1.86	1.89	1.91
Eutrofización marina	kg N eq	1.21	1.15	1.20	1.28	1.61
Ecotoxicidad terrestre	kg 1,4-DB eq	0.68	0.64	0.63	0.64	3.66
Ecotoxicidad de agua dulce	kg 1,4-DB eq	32.85	30.56	30.79	31.83	32.31
Ecotoxicidad marina	kg 1,4-DB eq	33.41	31.04	31.23	32.04	32.10
Ocupación de suelo agrícola	m <sup>2</sup> a	108.68	148.47	148.39	151.80	310.06
Ocupación de suelo urbano	m <sup>2</sup> a	21.02	20.24	20.33	20.73	21.48
Transformación del suelo natural	m <sup>2</sup>	0.73	0.68	0.68	0.68	1.95
Agotamiento del agua	m <sup>3</sup>	30.18	27.85	27.91	30.73	35.68
Agotamiento de metales	kg Fe eq	66.58	66.42	74.41	75.80	77.96
Agotamiento de fósiles	kg oil eq	1424.51	1326.23	1340.06	1312.30	1335.42

