

CONTART 2016. La Convención de la Edificación  
20 - 22 de abril de 2016; Granada (Spain): Colegio Oficial de Aparejadores y  
Arquitectos Técnicos de Granada. Consejo General de la Arquitectura Técnica  
de España, p.19-28

## CARACTERIZACIÓN ENERGÉTICA Y AMBIENTAL DE MATERIALES DE ALMACENAMIENTO DE CALOR LATENTE APLICADOS EN LA EDIFICACIÓN

CAMBRA, DAVID<sup>1</sup>; LOPEZ-SABIRÓN, ANA MARÍA<sup>1</sup>; ZABALZA, IGNACIO<sup>2</sup>;  
FERREIRA, GERMAN<sup>1</sup>

*1: Centro de Investigación de Recursos y Consumos Energéticos (CIRCE), Edificio CIRCE –  
Campus Río Ebro, Mariano Esquillor Gómez, 15, 50018 Zaragoza, España  
e-mail: dcambra@fcirce.es; amlopezs@fcirce.es; gferreira@fcirce.es web: <http://www.fcirce.es>*

*2: CIRCE-UZ: Centro de Investigación de Recursos y Consumos Energéticos (CIRCE) -  
Universidad de Zaragoza, Edificio CIRCE – Campus Río Ebro, Mariano Esquillor Gómez, 15,  
50018 Zaragoza, Spain  
e-mail: izabal@unizar.es, web: <http://www.fcirce.es>; <http://www.unizar.es>*

**Palabras clave:** materiales de cambio de fase; almacenamiento de energía; análisis de ciclo de vida; consumo energético; impactos ambientales.

### RESUMEN

El uso de materiales de cambio de fase representa una de las alternativas más prometedoras en cuanto a sistemas pasivos utilizados en edificación. No obstante, la correcta selección de estos materiales es fundamental, ya que su funcionamiento depende de varios aspectos como la climatología, la ubicación, el tipo de material seleccionado y sus características termofísicas.

Por tanto, el objetivo de este trabajo es realizar la caracterización energética y ambiental de la aplicación de estos materiales en edificación. Por un lado, mediante simulación se determina la demanda energética de climatización existente en un edificio modelo, con y sin la aplicación de estos materiales, y posteriormente, se realiza la caracterización ambiental considerando el enfoque del Análisis de Ciclo de Vida, obteniendo resultados para diferentes escenarios de aplicación sobre una base cerámica donde se ha estudiado el efecto de diversas variables como las Severidades Climáticas existentes en España o la naturaleza de los materiales de cambio de fase.

Esta investigación evidencia como la utilización de una solución constructiva formada por una baldosa cerámica y una capa de materiales de cambio de fase seleccionados

adecuadamente, no solo aporta descensos en la demanda energética en todas las condiciones climáticas, siendo en algunas de ellas superiores al 15%, sino que también se obtienen beneficios ambientales en cortos espacios temporales en comparación con la vida útil de la solución constructiva.

## 1. INTRODUCCIÓN

La legislación europea, a través de las Directivas 2010/31/CE [1] y 2012/27/UE [2], establecen requisitos cada vez más exigentes en materia de eficiencia energética en edificación, fijando como objetivo que todos los nuevos edificios residenciales, de oficinas y servicios que se construyan en la Unión Europea (UE) a partir de 2020 sean de edificios de consumo de energía casi nula (nZEB).

Además de estos nuevos edificios, la atención también está centrada en la rehabilitación energética en respuesta al crecimiento del consumo de los edificios residenciales. Y es que por ejemplo, en el caso español, este ascenso del consumo total y de consumo eléctrico es de un 17% y 25% respectivamente, siendo del 25% y 29% a nivel de la UE27 [3]. Además de la energía invertida en la fase de construcción, es importante considerar que los sistemas de climatización utilizados durante la fase de uso del edificio consumen más del 20% de la energía total invertida en el edificio [4]. Es por ello, que la introducción de nuevas alternativas que favorezcan la reducción de estos consumos energéticos puede suponer un notable ahorro de energía en la totalidad del ciclo de vida del edificio.

En este sentido, una de las alternativas más prometedoras es la incorporación de sistemas de almacenamiento de calor latente basados en sustancias de cambio de fase (PCM según sus siglas en inglés), seleccionando el material cuya temperatura de cambio de fase se encuentre en el rango de la temperatura de confort [5]. Estos materiales son capaces de almacenar y ceder calor en un rango de temperatura determinado, reduciendo el uso de los sistemas de climatización. Las tendencias en I+D están dirigidas a la integración de PCM en los elementos constructivos del propio edificio, con el fin de utilizar la singularidad de estos materiales para disminuir la demanda de energía en climatización, y por tanto, sus impactos ambientales asociados. En esta línea, existen estudios desarrollando una caracterización del comportamiento de un único PCM basado en el análisis de los mecanismos de transferencia de calor en un edificio para una de las severidades climáticas (SC) incluidas el Código Técnico de Edificación (CTE) [7]. Este estudio demostró que estos materiales ofrecen importantes posibilidades de ahorro, así como un menor impacto ambiental del conjunto del sistema. Adicionalmente, en otro estudio [6], se observó que existe una influencia significativa de las variables climatológicas y que la apropiada selección del PCM para cada SC es un factor esencial. Existen también publicaciones desde el punto de vista ambiental [9-13], que consideran ejemplos empíricos y experimentales concretos para una determinada zona climática.

Este estudio pretende caracterizar el comportamiento de estos materiales mediante una metodología, que permita conocer el comportamiento energético de los PCM más adecuados para la SC donde se encuentra el edificio ubicado, así como evaluarlos ambientalmente considerando todo su ciclo de vida.

## 2. METODOLOGÍA

Se ha utilizado una metodología híbrida, integrando de forma simultánea (i) la caracterización del comportamiento energético de un edificio convencional, con y sin integración de PCM en baldosas cerámicas instaladas en los cerramientos, para determinar los consumos de energía de climatización durante la fase de uso y (ii) la evaluación ambiental basada en el análisis de ciclo de vida (ACV) del sistema considerando la aplicación de PCM en baldosas cerámicas. La estructura seguida en la metodología es acorde al proceso de la construcción de un edificio o solución constructiva: fabricación del producto, puesta en obra, uso y fin de vida.

### 2.1 CARACTERIZACIÓN AMBIENTAL

Para cuantificar el impacto ambiental de la solución constructiva propuesta, se han considerado todas las etapas por las que pasa el producto, de acuerdo con la metodología de ACV [16], a partir de un enfoque “de la cuna a la tumba”. La metodología utilizada se basa en las normas ISO 14040:2006 e ISO 14044:2006 [16]. Los modelos de análisis se han desarrollado utilizando datos aportados directamente por empresas del sector cerámico, soportados y validados mediante bases de datos estandarizadas como la desarrollada por la Comisión Europea ELCD v2.0 [17] e Ecoinvent 2.2 [18]. Para el cálculo de las categorías de impacto ambiental se ha utilizado los factores de caracterización del método CML 2.05 [12]. Las bases de datos estandarizadas y el método de evaluación se basan en los requerimientos establecidos en las normativas de solicitud de una Declaración Ambiental de Productos (DAP) para la solución constructiva analizada dentro del programa DAPc [19].

### 2.2 CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO ENERGÉTICO

Para calcular los consumos energéticos de climatización asociados a la fase de uso de un edificio es necesario caracterizar el comportamiento energético de un edificio convencional (sin PCM) y otro en el que se han integrado los PCM considerando los diferentes casos de estudio.

La herramienta informática utilizada es el software ESP-r [20]. Se trata de una herramienta de simulación del edificio de código abierto creado por la Universidad de Strathclyde en la que se puede modelar el comportamiento térmico, acústico y visual de un edificio, así como estimar el calor, la humedad y la energía eléctrica consumida por el edificio modelado.

### 2.3 DEFINICIÓN DEL CASO DE ESTUDIO

Como caso objeto de estudio se ha planteado la simulación de una geometría base de una sola habitación de 16 m<sup>2</sup> de superficie útil y una altura libre de 2,7 m. Se trata de una geometría sencilla en forma de cubo, tal y como se muestra en la Figura 1.

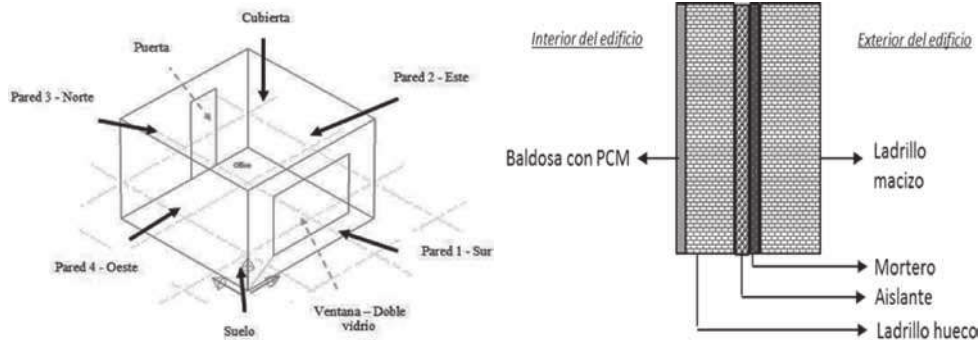


Figura 1. Construcción de la geometría base para el programa ESP-r (izqda) [20] y esquema de la colocación de la baldosa sobre la capa más interior del muro (dcha.). Elaboración propia.

La composición constructiva utilizada es la misma que incorpora el edificio de referencia para la certificación energética de edificios residenciales [21]. Como solución constructiva para la integración de los PCM se propone el uso de un producto innovador: una baldosa cerámica convencional con las propiedades térmicas específicas que aportan la adición de PCM en su estructura. La baldosa estudiada está formada por tres capas principales: base cerámica, capa de esmalte y capa de PCM (se adhiere a través de una resina que se considera como parte de la capa de PCM). Se han analizado diferentes PCM comerciales, incluyendo dos tipologías de diferente naturaleza química: parafinas y sales hidratadas. Se han seleccionado aquellas sustancias cuya temperatura de cambio de fase está cercana en el rango de confort de una edificación pudiendo localizarse en 21-28°C y con valores altos de calor latente. Los PCM seleccionados y sus principales características pueden verse en la Tabla 1, donde  $T_f$  es la temperatura de fusión,  $H_f$  el calor latente de fusión,  $\rho$  la densidad y  $k$  la conductividad térmica.

Tabla 1. Características principales de los PCM seleccionados para el estudio a partir de PCM comerciales. Elaboración propia

	PCM A	PCM B	PCM C	PCM D
<b><math>T_f</math></b>	28±1°C	25±1°C	28±1°C	24±1°C
<b><math>H_f</math></b>	180-195 J/g	230 kJ/kg	245kJ/kg	200kJ/kg
$\rho$	0,9 kg/l	0,88-0,77 kg/l	0,88-0,77 kg/l	1,38kg/l
<b><math>k</math></b>	n.d.	0,2 W/m.K	0,2 W/m.K	0,5-0,7W/m.K
<b>Tipo de material</b>	Parafina	Parafina	Parafina	Sulfato de sodio, agua y aditivos

Los diferentes espesores de PCM utilizados en la caracterización del sistema anteriormente definido han sido 1,35 mm, 5 mm y 10 mm. Estos espesores de PCM integrados en la solución constructiva de la baldosa han reportado diferentes valores de consumo energético, y por tanto variaciones en el impacto medioambiental en la solución constructiva.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados observados en el estudio se han desglosado en dos partes principales: caracterización de la demanda energética de climatización de la fase de uso y la evaluación de los impactos ambientales.

#### 3.1 CARACTERIZACIÓN DE LA DEMANDA ENERGÉTICA DE CLIMATIZACIÓN DE LA FASE DE USO

Desde el punto de vista de la demanda eléctrica para la climatización se ha realizado la caracterización energética de diferentes espesores de PCM en la baldosa, obteniéndose los resultados mostrados en la Tabla 2. Estos resultados demuestran como la integración de los PCM produce variaciones en la demanda eléctrica del sistema de climatización, variables en función de los tres criterios planteados: naturaleza del PCM, localización y espesor de la capa de PCM.

Considerando estos resultados, la elección de un PCM para una determinada SC es fundamental, ya que una elección equivocada puede convertirse en una carga térmica en alguna época del año en lugar de una reducción de la demanda. Tal y como muestra la Tabla 2 los mayores ahorros se obtienen para los PCM B y D, siendo el PCM B una parafina y el PCM D una sal hidratada. En estos casos las temperaturas del punto de fusión de ambos casos están en torno a 24 y 25°C, lo que confirma que puntos de fusión más cercanos a la temperatura de confort interior son precursores de mejores resultados. Aunque algunos autores [8, 10] han demostrado que las sales hidratadas tienen mejor rendimiento que las parafinas al tener por lo general mayores energías de calor latente, en este caso el PCM B que tiene una base de parafinas alcanza mejores rendimientos, ya que se trata de una parafina que en este caso posee un mayor valor de energía de calor latente de fusión.

PCM		ALMERIA		CASTELLON		BARCELONA		MADRID		LEÓN	
mm		Calef.	Refr.	Calef.	Refr.	Calef.	Refr.	Calef.	Refr.	Calef.	Refr.
Sin PCM		3,87	49,56	12,39	24,67	22,09	14,74	37,95	14,40	59,07	3,97
PCM A	1,35	3,72	49,41	12,17	21,22	21,84	14,88	37,67	14,50	58,70	3,98
	5	3,57	49,45	11,86	21,26	21,43	14,93	37,12	14,51	57,90	4,00
	10	3,43	49,10	11,73	21,01	21,40	14,74	37,22	14,38	58,10	3,87
PCM B	1,35	2,47	47,49	11,23	20,38	20,90	13,87	36,89	13,55	57,70	3,15
	5	2,24	47,52	10,92	20,46	20,47	13,89	36,30	13,52	56,88	3,13
	10	2,00	47,61	10,54	20,57	19,91	13,94	35,52	13,47	55,77	3,11
PCM C	1,35	3,72	49,41	12,18	21,23	21,84	14,89	37,67	14,50	58,70	3,97
	5	3,58	49,45	11,87	21,27	21,44	14,93	37,12	14,52	57,91	4,01
	10	3,40	49,60	11,50	21,38	20,91	15,04	36,41	14,56	56,88	4,08
PCM D	1,35	3,09	48,26	11,75	20,67	21,48	14,24	37,36	13,93	58,27	3,38
	5	2,94	48,13	11,56	20,64	21,24	14,21	37,09	13,88	57,94	3,34
	10	2,74	-48,03	11,34	20,61	20,94	14,17	36,76	13,83	57,5	3,32

Tabla 2. Resultados de las demandas energéticas anuales de climatización en las distintas SC (kWh/m<sup>2</sup>/año) obtenidas en la simulación con [20]. Elaboración propia

Aunque la tendencia mencionada se observa en la mayoría de las SC atendiendo al balance global, se observan algunas diferencias al analizar los resultados según los modos de calefacción y refrigeración. La diferencia del clima influye directamente

sobre estas sustancias: en el caso de León (E1) el funcionamiento óptimo se consigue en refrigeración, debido a unos veranos suaves con noches frías y las temperaturas fluctúan entre la temperatura de cambio de fase. En Almería (A4) los mayores ahorros se consiguen en calefacción, debido a inviernos débiles, con altas temperaturas diurnas. En este caso es evidente como la SC varía los ahorros conseguidos utilizando las diferencias de temperatura noche-día para almacenar el calor en los PCM, como también indica [9].

Observando el comportamiento de un incremento en la cantidad de PCM (variando el espesor de la capa con 1,35 mm, 5 mm y 10 mm) en cada una de las SC seleccionadas. Los resultados muestran como en prácticamente todos los casos la demanda energética desciende conforme se aumenta el grosor de la capa de PCM. Esto es debido a que al aumentar la masa de PCM incorporado aumenta por consiguiente su capacidad de almacenamiento de calor, ya que el calor latente es un calor específico por unidad de masa. En [14, 16] han realizado estudios para determinar esta tendencia. Aunque si bien las condiciones de operación no son las mismas, las tendencias encontradas son similares a las obtenidas en este proyecto. Sin embargo, como se observa en la Figura 2 en León y Almería, con SCI (severidad climática invierno) y SCV (severidad climática verano) más extremas, respectivamente, aunque se aumente la capa de PCM la tendencia de descenso de demanda energética no es tan acusada en la transición de 5 a 10 mm. Esto ocurre especialmente con los PCM A y C en los que las temperaturas de fusión de los PCM están más alejadas del punto de confort interior. Por tanto, en estos casos es necesario valorar la conveniencia de incrementar la capa de PCM y por consiguiente sus consumos materiales.

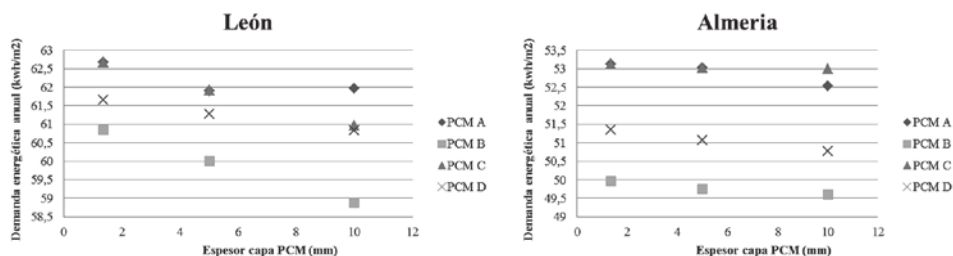


Figura 2. Demanda energética anual obtenida en las simulaciones en función del espesor de PCM aplicado en diferentes PCM y SC. Elaboración propia según cálculos realizados con [20].

Atendiendo a los ahorros conseguidos en función de las diferentes SC se puede establecer un criterio de adecuación de cada según PCM. Considerando la demanda total anual por unidad de superficie de baldosa, se observa que los mayores ahorros energéticos se obtienen en el caso de Castellón (B3), una SC media con inviernos suaves y veranos cálidos aunque no extremos. En este caso, destaca especialmente el PCM B, con una  $T_f$  de 25°C y aun alto valor de capacidad de almacenamiento energético, aunque todos los PCM analizados en este estudio demuestran tener un buen rendimiento con valores de ahorro entre 10-15%. El resto de SC tienen un comportamiento semejante para esta comparativa. Estos resultados pueden ser comparados con los conseguidos por [14].

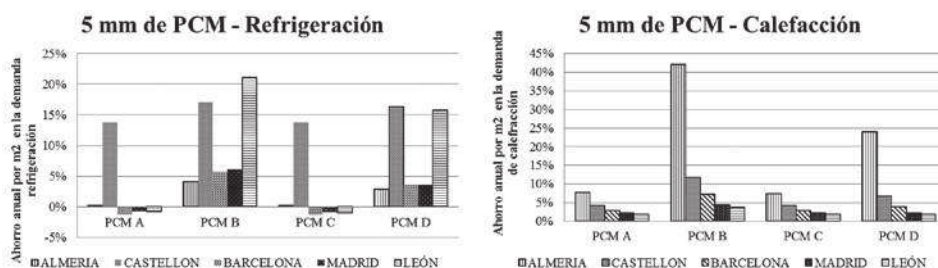


Figura 3. Resultados del porcentaje de disminución de la demanda de energía debido a la integración de 5mm de PCM según severidad climática. Elaboración propia según cálculos realizados con [20].

Analizando la climatización en función de las SCV e SCI, se observan diferencias. En la Figura 3, se muestra como el PCM y la SCV tienen una gran dependencia. Mientras que en el caso de Castellón el efecto siempre es positivo y se consiguen ahorros independientemente del PCM, otras SC como León (E1) muestran ahorros significativos en el caso del PCM B y D, pero contribuyen negativamente en el caso del PCM A y C. Este efecto es especialmente importante en el caso del PCM C, el cual tiene un funcionamiento negativo en todas las SC excepto la B3 en el caso del modo de refrigeración.

Por otro lado, en el modo de calefacción las tendencias son siempre positivas en cuanto a obtener ahorros energéticos. Sin embargo, destaca Almería (A4) en combinación con el PCM B y el PCM D. El resto tienen un comportamiento similar, descendiendo los ahorros conforme aumenta la SCI.

En conclusión, los resultados presentados muestran como la SC, la naturaleza del PCM, y la cantidad de PCM tienen una influencia importante en los ahorros y demuestran la importancia de la correcta selección acorde a todas las variables como aparece parcialmente referenciado en literatura [6].

### 3.2 EVALUACIÓN DE LOS IMPACTOS AMBIENTALES

La evaluación de los beneficios ambientales de la integración de PCM debe valorarse desde un enfoque de ciclo de vida, ya que se debe contemplar toda la vida útil de una solución constructiva o edificación. En el caso objeto de estudio, el PCM es incorporado sobre una baldosa de base cerámica, por lo que la etapa de fabricación se centra en este proceso productivo. Posteriormente se instala y con los resultados del análisis energético se completa el ICV para la fase de uso. Quedando al final del ciclo la etapa de fin de vida. Como se muestra en la Tabla 3 la integración de PCM en la baldosa cerámica resulta beneficiosa en la totalidad de los casos estudiados al analizar los impactos ocasionados en todo el ciclo de vida del producto.

Los mayores impactos están en la fase de uso, a lo largo de los 50 años de vida útil. Se trata de un resultado alineado con las conclusiones de [4] considerando diferentes condiciones de operación. La integración de los PCM, provoca una disminución variable de impactos, del orden del 6% respecto a un caso base que no contemplase la integración de PCM.

La elección de la naturaleza del PCM representa un factor clave, ya que la utilización de naturalezas con menores impactos disminuirá el impacto ambiental. Sin embargo, esta elección debe ser tomada en cuenta también analizando los beneficios ambientales de su uso, ya que la selección final debe ser motivada por su rendimiento ambiental total a lo largo de todo el ciclo de vida.

Observando estas características, respecto a la producción, los menores impactos ambientales recaen sobre el PCM inorgánico, basado en una sal hidratada. Siendo el indicador de calentamiento global la mitad que la media de los impactos ambientales asociados a los PCM orgánicos de base parafínica. En la fase de uso, la disminución de la demanda energética del habitáculo, ocasiona un menor consumo y, por tanto, una reducción de impacto ambiental en climatización, variable según la SC.

Cabe destacar, que de forma similar al estudio energético de los PCM, existen configuraciones de tipo PCM/SC/ESPESOR que ocasionan un incremento del potencial de calentamiento global en el ACV del caso de estudio, por lo que resulta muy relevante, la simulación energética de las condiciones de operación de los PCM. En el caso de la variación del espesor de PCM, los impactos asociados se determinarán a través de un incremento lineal de la cantidad de PCM, es por ello que a mayor espesor se produce un mayor impacto en la fase de producción, aunque también puede apreciarse una disminución del impacto ambiental en la fase de uso en algunos casos.

Tabla 3. Indicador calentamiento global obtenidos en la simulación en función de la naturaleza del PCM en la SC B3. Elaboración propia según cálculos realizados a partir de [16-20].

TIPO DE PCM y ESPESOR (mm)		kg CO <sub>2</sub> eq /m <sup>2</sup> baldosa/ m <sup>2</sup>	% RESPECTO CASO BASE
Sin PCM		1.268,80	100%
PCM A	1,35	1.150,07	90,64%
PCM A	5,00	1.151,76	90,77%
PCM A	10,00	1.153,73	90,93%
PCM B	1,35	1.088,96	85,83%
PCM B	5,00	1.087,68	85,72%
PCM B	10,00	1.087,43	85,70%
PCM C	1,35	1.149,14	90,57%
PCM C	5,00	1.146,52	90,36%
PCM C	10,00	1.146,60	90,37%
PCM D	1,35	1.115,50	87,92%
PCM D	5,00	1.113,08	87,73%
PCM D	10,00	1.111,49	87,60%

En cuanto a la relación del comportamiento medioambiental con la ubicación geográfica, obviamente los impactos varían según la SC donde se localice el caso de estudio, debido a la variación de los ahorros en climatización.



#### 4. CONCLUSIONES

Los resultados demuestran que la integración de PCM en baldosas de base cerámica permite obtener descensos en la demanda energética en todas las condiciones climáticas, si bien es cierto que su valor depende de la climatología concreta de cada una de ellas, siendo mayores las posibilidades en las SC intermedias. El ahorro conseguido varía en función del comportamiento de los PCM en cada una de las SC analizadas, evidenciando que existen mayores ahorros energéticos en aquellas zonas donde la SCV presenta un comportamiento más severo, y peor en aquellas donde las necesidades de refrigeración son menores. Adicionalmente, se ha observado que los mayores ahorros energéticos se han obtenido en los periodos de uso de calefacción.

Por tanto, preliminarmente se ha demostrado como la selección del PCM tiene que realizarse acorde a las condiciones climáticas existentes en una ubicación determinada para optimizar el rendimiento de estos materiales y maximizar los ahorros a obtener. Además se ha comprobado cómo el criterio de elección del rango de temperaturas de fusión de los PCM para su uso en edificación debe centrarse en un rango cercano a las temperaturas de confort de 23-24°C, ya que las capacidades de funcionamiento aumentan favoreciendo el comportamiento energético del caso de estudio.

Por otra parte, este estudio ha demostrado que los beneficios ambientales asociados al ahorro de energía producido por estos materiales durante la fase de uso son suficientes para compensar el impacto ambiental causado durante su fabricación, instalación y posterior fin de vida, con variaciones importantes según el clima en el que se instalen. Se observa que en SC intermedias, con temperaturas diarias alrededor de la temperatura de cambio de fase de la PCM, se amplía la fase de funcionamiento del PCM y se aumenta la reducción del impacto ambiental durante la fase de uso.

Otro de los criterios estudiados, la naturaleza del PCM, ha evidenciado que la utilización de PCM con una composición a base de sales hidratadas tiene un menor impacto en su fabricación, y facilita su amortización ambiental respecto a la utilización de parafinas. Sin embargo, en el caso de las parafinas con Tf en torno a 25°C, pese a establecer un incremento moderado de los impactos en la fase de producción, la disminución de los impactos ambientales en la fase de uso establece un balance positivo desde el punto de vista del análisis completo del ciclo de vida.

#### 5. AGRADECIMIENTOS

Esta publicación ha sido desarrollada a partir de los resultados obtenidos dentro del marco del Proyecto ECOM4TILE (IPT-2011-1508-920000) co-financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación de España. Además, David Cambra agradece la beca otorgada por Colegio de Arquitectos Técnicos de Zaragoza (COATZ) para la divulgación de este estudio.

## 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Directiva 2010/31/UE - eficiencia energética de los edificios. (2010). Parlamento Europeo.
- [2]. Directiva 2012/27/UE - eficiencia energética. (2012). Parlamento Europeo.
- [3] Análisis del consumo energético del sector residencial en España Informe Final.(2011). IDAE
- [4] Pérez-Lombard, L., Ortiz, J. & Pout, C. (2008) A review on buildings energy consumption information. *Energy and Buildings*, 40 (3), 394-398.
- [5] Reglamento de Instalaciones Térmicas Edificios. (2013). Ministerio de Industria Energía y Turismo.
- [6] Aranda-Usón, A., Ferreira, G., López-Sabirón, A.M., Mainar, M.D. & Zabalza, I. (2012). Phase change material applications in buildings: An environmental assessment for some Spanish climate severities, *Science of the Total Environment*, 444, 16–25.
- [7] Documento Básico DB-HE «Ahorro de Energía», del Código Técnico de la Edificación. (2013). Ministerio de Fomento, Gestión ambiental.
- [8] Castell, A., Menoufi, K., De Gracia, A., Rincón, L., Boer, D. & Cabeza, L.F. (2012). Life Cycle Assessment of alveolar brick construction system incorporating phase change materials (PCMs). *Applied Energy*, 101, 600-608.
- [9] De Gracia, A., Rincón, L., Castell, A., Jimenez, M., Boer, D., Medrano, M. & Cabeza, L.F. (2010). Life Cycle Assessment of the inclusion of phase change materials (PCM) in experimental buildings. *Energy and Buildings*, 42, 1517-1523.
- [10] Carbonari, A., De Grasi, M. & Di Perna, C. (2006). Numerical and experimental analyses of PCM containing sandwich panels for prefabricated walls. *Energy and Buildings*, 38, 472-483.
- [11] Lamberg, P. Lehtiniemi, R. & Henell, A.M. (2004). Numerical and experimental investigation of melting and freezing processes in phase change material storage. *International Journal of Thermal Sciences*, 43(3), 277-287.
- [12] Antón, M., Montero, J.I. & Baldasano, J.M. (2004). Utilización del Análisis del ciclo de vida en la evaluación del impacto ambiental del cultivo bajo invernadero mediterráneo. *Universitat Politècnica de Catalunya*.
- [13] Zhang, M., Medina, M.A., & King, J.B. (2008). Development of a thermally enhanced frame wall with phase-change materials for on-peak air conditioning demand reduction and energy savings in residential buildings. *International Journal of Energy Research*, 29(9), 795-809.
- [14] Heim, D. & Clarke, J.A. (2004). Numerical modelling and thermal simulation of PCM-gypsum composites with ESP-r. *Energy and Buildings*, 36(8), 795-805.
- [15] Zhou, G., Zhang, Y., Wang, X. & Lin, K. (2007). An assessment of mixed type PCM-gypsum and shape-stabilized PCM plates in a building for passive solar heating. *Solar Energy*, 81(11), 1351-1360.
- [16] Análisis de ciclo de vida. Requisitos y directrices. (2006). AENOR, Gestión ambiental.
- [17] Plataforma europea de análisis de ciclo de vida. (2014). *European Reference Life Cycle Database (ELCD)*. Accedido el 20 de noviembre, 2015 desde <http://lca.jrc.ec.europa.eu/>
- [18] Theecoinvent Database. (2014). Ecoinvent Association.
- [19] Agenda de la Construcción Sostenible. (2012). *Biodiversity and Conservation Declaración Ambiental de producto (DAPc)*. Accedido el 20 de noviembre, 2015 desde <http://www.csostenible.net/>
- [20] University of Strathclyde (2014). *ESP-r: energy modelling tool for the simulation of the thermal visual and acoustic performance of buildings and the energy use and gaseous emissions associated with associated environmental control systems*.
- [21] Procedimiento básico para la certificación de la eficiencia energética de los edificios. (2013). Ministerio de la Presidencia de España.