

ANÁLISIS DEL EFECTO DE MATERIALES DE CAMBIO DE FASE SOBRE LA DEMANDA DE CALEFACCIÓN EN UNA CASA FOTOVOLTAICA

Rebelo F.**, **Corredera A.***, **Andrés M.***, **Vicente R.****, **Morentin F.***, **Ferreira V.M.****, **Samaniego J.***,
Figueiredo A.**, **Bujedo L.A.***

* División de Energía, Centro Tecnológico CARTIF, Parque Tecnológico de Boecillo, parc. 205, Boecillo, 47151 (Castilla y León) España, luibuj@cartif.es

** RISCO, Departamento de Engenharia Civil, Campus Universitário de Santiago, Universidade de Aveiro, 3810-193, (Aveiro), Portugal.

<https://doi.org/10.34637/cies2020.1.5089>

RESUMEN

Este trabajo evalúa el efecto que tiene la integración de materiales de cambio de fase (MCF) en la envolvente de los edificios, sobre la operación de un sistema de generación solar fotovoltaica acoplado con bomba de calor para cubrir las necesidades térmicas de dicho edificio. A partir de una instalación a escala real, se han realizado modelos en EnergyPlus de diferentes escenarios de estudio intermedios, teniendo en cuenta que la aplicación de los MCF microencapsulados como revestimiento de paredes interiores, requiere de un material de sustrato y un mortero para que se incorpore, evaluando de esta forma el efecto que tiene cada uno de los elementos. Se ha simulado y evaluado el efecto en cada escenario de estudio sobre la demanda energética del demostrador, desde la solución constructiva del fabricante hasta la solución con el mortero aditivado con MCF aplicado como recubrimiento interior de las paredes. En paralelo se ha realizado la simulación mediante TRNSYS de una instalación fotovoltaica de 50, 100, 200 y 300 W conectadas a una bomba de calor sobre la que se ha considerado que tiene un rendimiento en calefacción de 3 y un rendimiento de refrigeración de 2. Los resultados muestran que hay una gran cantidad de energía de calefacción que se pierde en los momentos en los que la demanda de calefacción es reducida y la disponibilidad de energía solar es alta. También se ha podido comprobar que el dimensionado para refrigeración es más crítico que para calefacción. Finalmente cabe indicar que el presente trabajo se ha realizado dentro del marco del proyecto SUDOKET financiado por la convocatoria Interreg SUDOE.

PALABRAS CLAVE: Materiales de cambio de fase, fotovoltaica, simulación dinámica, eficiencia energética, morteros

ABSTRACT

The present work evaluates the effect that the incorporation of Phase Change Materials (PCM) in the building envelope has in the operation of a solar photovoltaic (PV) generation system coupled with a heat pump for covering the thermal demand of a building. Based on data from a real scale facility, the EnergyPlus models of different case scenarios have been performed, taking into account that the application of microencapsulated PCM as an interior wall coating requires a substrate material and a mortar matrix to be embedded into. The effect on each case scenario on the buildings energy demand, from the manufacturer constructive walls solution until the PCM enhanced mortar applied as the interior wall coating, has been simulated and evaluated. In parallel, the TRNSYS simulation of a solar photovoltaic (PV) system has been performed, considering 50, 100, 200 and 300 W connected to a heat pump with a heating performance of 3 and a cooling performance of 2. The obtained results show that there is a large amount of heating energy that is wasted when the demand for heating is low and the availability of solar energy is high. It has also been demonstrated that sizing for cooling is more critical than for heating. Finally, it should be indicated that this work has been carried out within the SUDOKET project financed by the Interreg SUDOE programme.

KEYWORDS: Phase Change Materials (PCM), photovoltaic, dynamic simulation, energy efficiency, mortars

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de almacenamiento de energía térmica (*TES*) y los sistemas constructivos térmicamente activados *TABS* (Arce et al. 2011; Oliveri et al. 2018) combinados con el uso de energía solar, están demostrando un alto potencial de ahorro energético al reducir la demanda manteniendo el confort térmico en los edificios, con el fin de conseguir construcciones más sostenibles (Cunha y Aguilar 2020).

En los últimos años, la construcción ligera está experimentando un rápido crecimiento presentando varias ventajas frente a la construcción convencional: menor coste, reducida producción de residuos en obra, mayor rapidez de construcción, casi 100 % reciclable y alta versatilidad arquitectónica. Sin embargo el mayor inconveniente está relacionado con la reducida masa térmica, que puede comprometer el confort interior por problemas de termorregulación y sobrecalentamiento (Soares et al. 2014). En este sentido, los sistemas de almacenamiento de energía térmica (*TES*) permiten el equilibrio de las necesidades energéticas entre el día y la noche, aprovechando el almacenamiento energético del calor latente de los materiales (Marin et al. 2016). Los MCF tienen la capacidad de almacenar más energía en forma latente, además del calor sensible permitiendo almacenar el calor y realizar el intercambio en otro momento. Por ello se presentan como elementos con los que se puede alisar pasivamente la curva de demanda, teniendo un efecto directo sobre la potencia de instalación de climatización, actuando como termorreguladores pasivos de temperatura (Amaral et al. 2017; Figueiredo et al. 2016, Jamil et al. 2016 y Frazzica et al. 2019).

Uno de los objetivos del proyecto SUDOKET de la convocatoria Interreg SUDOE, que incluye la investigación realizada en el ámbito de este artículo, es evaluar el efecto de los MCF sobre el perfil de demanda de energía en la climatización (*KETmaterials*). Para ello, se han instalado dos casetas idénticas, de construcción ligera (y consecuentemente de baja inercia térmica) como se muestra en la Fig. 1, en la que una se ha tomado una como referencia de base y en la otra se han instalado diferentes recubrimientos de MCF. Se las está, sometiendo a una serie de ensayos tanto de régimen libre como con temperatura interior controlada, monitorizando tanto las condiciones interiores como exteriores en ambos demostradores a lo largo de un año, con el fin de poder evaluar el impacto real que tienen diferentes MCF sobre la evolución de las temperaturas interiores y la demanda de calefacción y refrigeración en los equipos de bomba de calor/aire acondicionado instalados.



Fig. 1. Casetas demostradoras del proyecto SUDOKET

En el presente trabajo, se han modelado y simulado de manera dinámica diferentes casos de recubrimiento superficial interior, tomando como base las soluciones constructivas ligeras (de inercia térmica leve) de los demostradores de referencia, ajustando los parámetros del modelo con valores obtenidos de diferentes pruebas realizadas sobre ellos, a los que se les ha aplicado una planta de climatización solar fotovoltaica de diferentes tamaños, siendo posible la obtención de criterios de diseño.

Las soluciones constructivas base de la envolvente térmica los demostradores de referencia son las siguientes:

- Paredes: panel sándwich con aislamiento térmico de 8 cm de espesor (espuma de poliuretano).
- Techo: techo metálico con 16 cm de aislamiento térmico (lana mineral) en la superficie interior.
- Suelo: suelo de vinilo sin aislamiento térmico y ventilado debajo.
- La fachada sur de los demostradores tienen una ventana de vidrio doble y una puerta exterior opaca.

METODOLOGIA

La incorporación de MCF en los materiales de construcción se puede realizar mediante varios métodos, como la incorporación directa, inmersión, encapsulación y estabilización (Cunha y Aguilar 2020), teniendo en cuenta que las formas en que se va a contener el MCF depende de la aplicación de almacenamiento térmico que se pretenda.

En el presente trabajo, la aplicación de los MCF elegida fue su incorporación a una matriz de mortero, por lo que se utilizó MCF microencapsulado. Al tratarse de un recubrimiento de mortero con MCF su aplicación requiere una serie de elementos adicionales de carácter logístico como, por ejemplo, un sustrato que de rigidez al recubrimiento y permita su manejo. Para ello se han tomado una serie de planchas cuadradas de aislamiento térmico (XPS) con 1 cm de espesor, del tipo Wedi, como se muestra en la Fig. 2.



Fig. 2. Demostrador con lo sustrato de placas de aislamiento (Wedi): sin (a) y con (b) aplicación de los recubrimientos MCF.

Se han considerado dos tipos de materiales de cambio de fase microencapsulados. Por un lado el BASF Micronal[®] DS 5001X con una temperatura de cambio de fase de 26 °C y por otro el CrodaTherm[™] ME29P con temperatura de cambio de fase en 29 °C y con el punto de cristalización en 23,5 °C, cuyas propiedades se muestran en Tabla 1. Los materiales de cambio de fase microencapsulados se incorporan en la matriz de mortero que posteriormente se aplica sobre el sustrato.

A partir de las características constructivas de los demostradores SUDOKET, con los valores identificados de conductividad térmica e medidos para infiltraciones de aire, se han realizado una serie de modelos bajo el entorno EnergyPlus (2020), considerando diferentes recubrimientos de MCF calculando su demanda de climatización horaria y manteniendo la temperatura interior dentro de los valores de confort, es decir entre 20 y 25 °C.

Tabla 1. Propiedades de los MCF considerados (conforme la ficha técnica).

Designación del Producto	Tipo de Producto	Temperatura de Cambio de Fase (°C)	Capacidad Calorífica (kJ kg ⁻¹)	Densidad (kg m ⁻³)
Micronal [®] DS 5001 X	Microencapsulado	26,0	110	250-350
CrodaTherm [™] ME 29P	Microencapsulado	28,8	183	337

Se han evaluado los siguientes escenarios de estudio:

1. Modelo Base: Paredes formadas por cerramientos tipo sándwich de 8 cm de aislamiento.
2. Modelo Base + Wedi: A las paredes del modelo base, se les ha añadido un recubrimiento de placas de aislamiento térmico tipo Wedi (lo sustrato en Fig. 2 (a)).
3. Modelo Base + Wedi + Mortero: Al modelo 2 se le ha añadido el mortero de referencia, sin el MCF.
4. Modelo Base + Wedi + Mortero + PCM26: Al modelo 3, se le ha añadido un MCF, Micronal[®] DS 5001X con 26 °C de temperatura de cambio de fase.
5. Modelo Base + Wedi + Mortero + PCM29: Al modelo 3, se le ha añadido un MCF Crodatherm[™] ME 29P con 29°C de temperatura de cambio de fase y simulado según el método 1, como se explica a continuación.
6. Modelo Base + Wedi + Mortero + PCM29: Al modelo 3, se le ha añadido un material de cambio de fase Crodatherm[™] ME 29P con 29 °C de temperatura de cambio de fase y simulado según el método 2, como se explica a continuación.

Se han considerado dos escenarios para la simulación dinámica con PCM29 (Crodatherm[™] ME 29P) debido a que la versión 9.3.0 de EnergyPlus permite dos opciones de simulación para lo comportamiento de los materiales con cambio de fase:

- El primer método se basa en la entalpía total, la temperatura máxima del punto de fusión y las temperaturas iniciales y final del cambio de fase.
- El segundo método se basa en la introducción en el *software* de los valores de la curva temperatura-entalpía para todo el proceso de cambio de fase.

Las simulaciones realizadas han considerado unas infiltraciones de 1,4 renovaciones de aire por hora, con condiciones de aire estándar para mantener la temperatura interior de confort entre 20 y 25°C. Este valor es el resultado de las pruebas de estanqueidad según la norma EN 13829:2001 (*Blowerdoor Test*) realizadas en los demostradores de referencia, como muestra en la Fig. 3.



Fig. 3. Prueba de estanqueidad.

En la Fig. 4 se muestra la metodología adoptada para las simulaciones dinámicas realizadas para cada escenario de estudio en EnergyPlus y la geometría del modelo numérico de la zona térmica del demostrador. Es importante señalar que todos los elementos de sombreado existentes en el entorno de los demostradores se tuvieron en cuenta en los modelos numéricos.

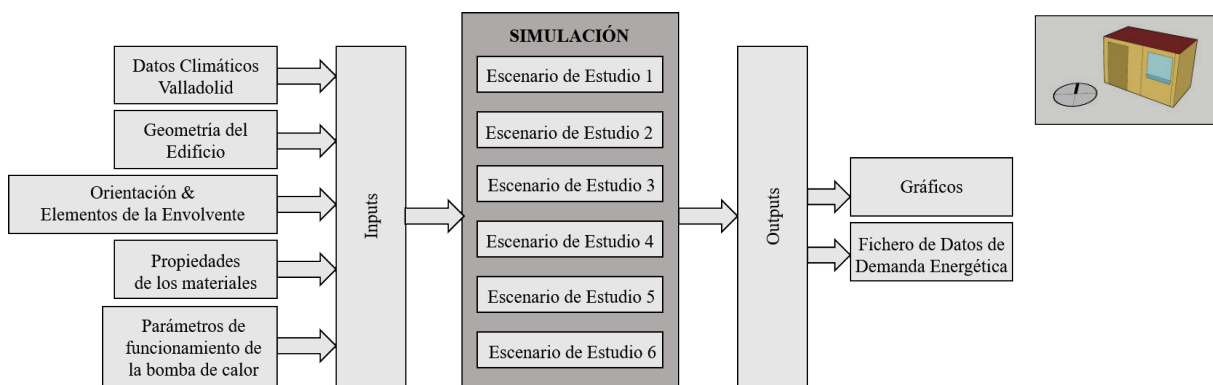


Fig. 4. Diagrama de la metodología adoptada en EnergyPlus y modelo.

En paralelo se ha simulado en TRNSYS una planta fotovoltaica de diferentes potencias en régimen de autoconsumo sin inyección a red, de forma que la energía excedentaria se pierde y se han comparado los resultados de producción con los datos de demanda en cada uno de los casos de estudio, considerando que la climatización se realiza con una bomba de calor aire/aire con un rendimiento de calefacción de 3 y un rendimiento de refrigeración de 2. Las simulaciones en ambos entornos (EnergyPlus, TRNSYS) se han realizado con el mismo año meteorológico tipo, en formato EnergyPlus (.epw) para Valladolid con el fin de poder comparar los resultados obtenidos.

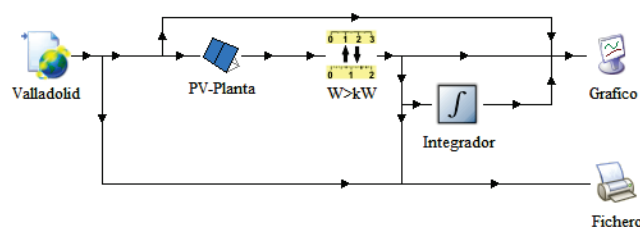


Fig. 5. Diagrama TRNSYS de la instalación fotovoltaica.

RESULTADOS

En la Fig. 6 se muestran los perfiles de demanda horarios anuales para cada uno de los casos obtenidos de la simulación dinámica en EnergyPlus. Como se puede apreciar, el efecto del recubrimiento de placas de aislamiento térmico tipo Wedi (b) y el mortero de referencia (c) tienen poco impacto sobre la demanda comparada con el caso base (a), siendo las curvas de demanda de calefacción (amarilla) y refrigeración (azul) de valores semejantes. Además se puede ver como la temperatura interior (verde) se mantiene dentro de la banda de diseño. Sin embargo, los casos en que se utiliza mortero aditivado con MCF (d, e y f), estos producen una reducción importante en los perfiles de demanda tanto de calefacción como de refrigeración.

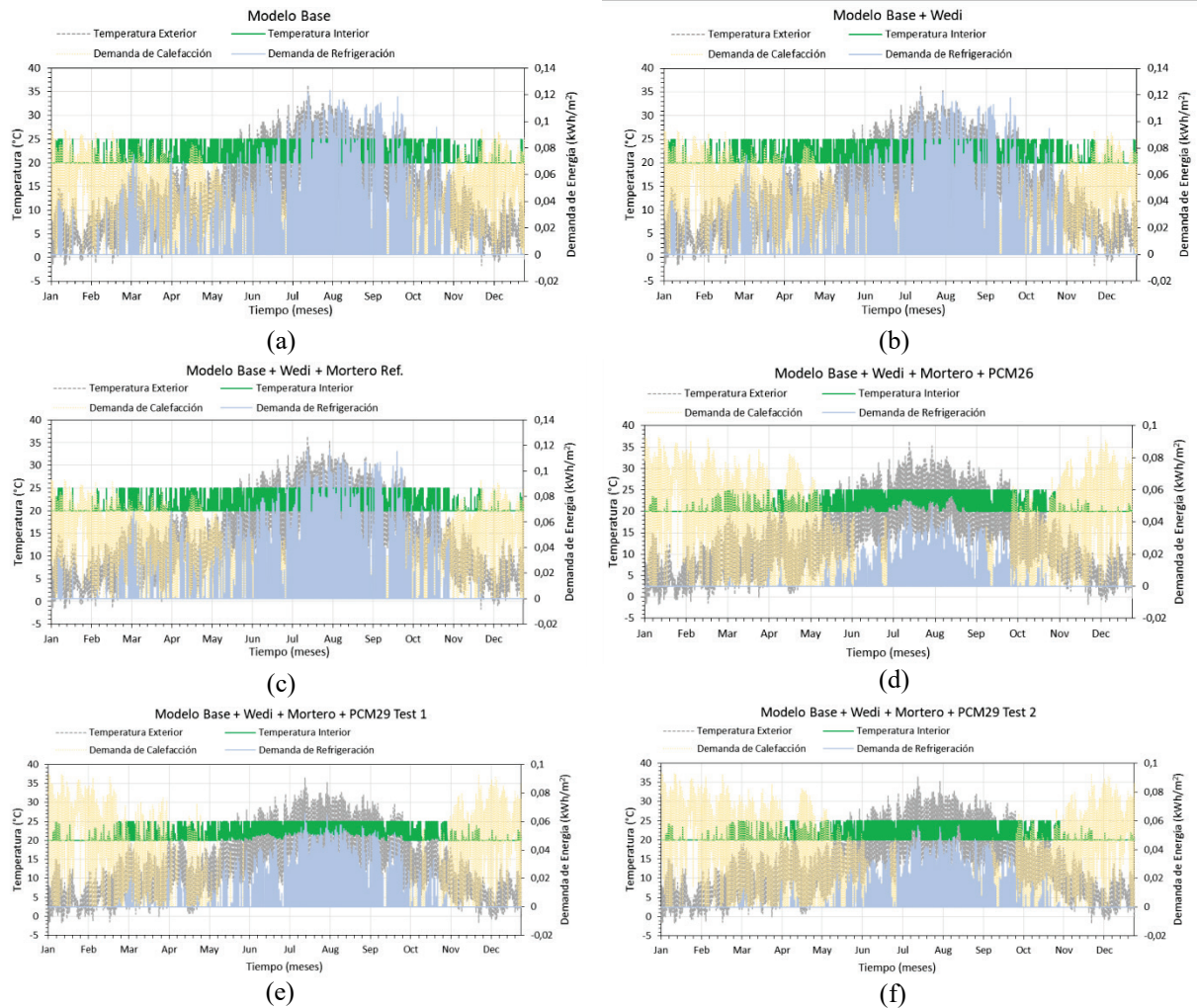


Fig. 6. Perfiles de demanda anual en cada uno de los casos de estudio.

En la tabla 2 se muestra la demanda anual total de calefacción y refrigeración para cada uno de los casos de estudio.

Tabla 2. Demandas térmicas para cada uno de los escenarios de estudio.

Escenario de estudio	Demanda total de calefacción [kWh/año]	Demanda total de refrigeración [kWh/año]
Modelo base (BASE)	2.013,67	429,70
Base+Wedi (B+W)	1.996,63	424,36
Base+Wedi+Mortero (B+W+M)	1.964,39	391,01
Base+Wedi+Mortero+PCM26 (PCM26)	1.625,35	118,41
Base+Wedi+Mortero+PCM29 Test 1 (PCM29-1)	1.156,22	208,04
Base+Wedi+Mortero+PCM29 Test 2 (PCM29-2)	1.831,67	164,26

Para poder evaluar el efecto neto que los MCF tiene sobre la demanda, hay que comparar los resultados del escenario 3 con los escenarios 4, 5 y 6, sirviendo los escenarios 1 y 2 para aislar el efecto del sustrato y el mortero. De esta forma se tiene que el PCM29 Test 1, es el que permite obtener la mínima demanda térmica con una reducción del consumo del 41 % respecto al escenario 3, mientras que el PCM26 es con el que se obtiene una menor demanda de refrigeración con una reducción del 70 % también con respecto al escenario 3. Con los datos de producción de la instalación fotovoltaica, se han estimado los valores anuales considerando potencias de fotovoltaica de: 50 W, 100 W, 200 W y 300 W conectadas a la bomba de calor, y que se pueden ver en las tablas 3, 4, 5 y 6 con los siguientes valores:

- Para facilitar la comparación, en la primera columna se han reproducido los resultados de la tabla 1 correspondientes a la demanda en kWh/año.
- La segunda columna, muestra la producción térmica (kWh/año) de la bomba de calor conectada a la instalación fotovoltaica, siendo el valor de la producción máxima que se puede tener.

- La tercera columna, indica la demanda que queda pendiente por cubrir en la instalación con aporte eléctrico de la red, teniendo en cuenta que la planta solar aporta refrigeración y calefacción (kWh/año).
- La cuarta columna representa el aporte neto de energía soportado con la fotovoltaica, calculada como la diferencia entre las columnas 1 y 3.
- La quinta columna indica la fracción de demanda cubierta por la planta fotovoltaica, calculada como el aporte desde la bomba de calor frente a la demanda total (columna 4 entre la 1).
- La sexta columna se corresponde con la energía perdida debida a falta de acoplamiento entre cargas, calculada como la diferencia entre la columna 2 y la columna 4.
- La última columna indica el porcentaje de energía perdida calculado como la fracción de la sexta columna respecto a la segunda columna.

Tabla 3. Datos para el caso de instalación fotovoltaica de 50 W.

FV = 50 W		Demanda [kWh]	Prod BC [kWh]	Demanda con FV	Aporte BC [kWh]	Fracción solar [%]	Pérdida [kWh]	Pérdida [%]
Base	Calefacc	2.013,67	72,78	1.957,33	56,34	2,80%	16,44	22,59%
	Refrig	429,70	86,16	351,67	78,03	18,16%	8,13	9,44%
B+W	Calefacc	1.996,63	73,53	1.939,72	56,92	2,85%	16,61	22,59%
	Refrig	424,36	85,32	347,20	77,17	18,18%	8,15	9,56%
B+W+M	Calefacc	1.964,39	81,78	1.903,43	60,96	3,10%	20,82	25,46%
	Refrig	391,01	76,30	323,46	67,55	17,28%	8,75	11,47%
PCM26	Calefacc	1.625,35	71,56	1.570,89	54,46	3,35%	17,09	23,89%
	Refrig	118,41	57,53	72,08	46,33	39,12%	11,21	19,48%
PCM29-1	Calefacc	1.156,22	50,81	1.115,96	40,26	3,48%	10,55	20,77%
	Refrig	208,04	61,43	147,26	60,79	29,22%	0,64	1,04%
PCM29-2	Calefacc	1.831,67	84,29	1.768,35	63,32	3,46%	20,98	24,89%
	Refrig	164,26	61,43	112,68	51,58	31,40%	9,85	16,03%

Tabla 4. Datos para el caso de instalación fotovoltaica de 100 W.

FV = 100 W		Demanda [kWh]	Prod BC [kWh]	Demanda con FV	Aporte FV [kWh]	Fracción cubierta [%]	Pérdida [kWh]	Pérdida [%]
Base	Calefacc	2.013,67	145,56	1.915,92	97,75	4,85%	47,81	32,85%
	Refrig	429,70	172,33	283,68	146,02	33,98%	26,31	15,27%
B+W	Calefacc	1.996,63	147,06	1.897,91	98,72	4,94%	48,34	32,87%
	Refrig	424,36	170,64	279,94	144,42	34,03%	26,22	15,36%
B+W+M	Calefacc	1.964,39	163,56	1.858,45	105,94	5,39%	57,62	35,23%
	Refrig	391,01	152,59	264,07	126,94	32,47%	25,65	16,81%
PCM26	Calefacc	1.625,35	143,11	1.530,17	95,18	5,86%	47,94	33,49%
	Refrig	118,41	115,07	39,78	78,63	66,40%	36,44	31,67%
PCM29-1	Calefacc	1.156,22	101,63	1.084,71	71,51	6,19%	30,11	29,63%
	Refrig	208,04	122,85	99,25	108,79	52,29%	14,06	11,45%
PCM29-2	Calefacc	1.831,67	168,59	1.721,37	110,30	6,02%	58,29	34,57%
	Refrig	164,26	122,85	73,46	90,80	55,28%	32,05	26,09%

Tabla 5. Datos para el caso de instalación fotovoltaica de 200 W.

FV = 200 W		Demanda [kWh]	Prod BC [kWh]	Demanda con FV	Aporte FV [kWh]	Fracción cubierta [%]	Pérdida [kWh]	Pérdida [%]
Base	Calefacc	2.013,67	291,13	1.854,99	158,68	7,88%	132,45	45,49%
	Refrig	429,70	344,66	171,91	257,79	59,99%	86,87	25,21%
B+W	Calefacc	1.996,63	294,12	1.836,62	160,01	8,01%	134,11	45,60%
	Refrig	424,36	341,28	169,33	255,04	60,10%	86,25	25,27%
B+W+M	Calefacc	1.964,39	327,12	1.793,81	170,59	8,68%	156,54	47,85%
	Refrig	391,01	305,19	165,84	225,18	57,59%	80,01	26,22%
PCM26	Calefacc	1.625,35	286,23	1.470,54	154,81	9,52%	131,42	45,91%
	Refrig	118,41	230,14	12,20	106,21	89,70%	123,92	53,85%
PCM29-1	Calefacc	1.156,22	203,25	1.037,17	119,05	10,30%	84,20	41,43%
	Refrig	208,04	245,70	36,82	171,22	82,30%	74,48	30,32%
PCM29-2	Calefacc	1.831,67	337,18	1.654,68	176,99	9,66%	160,19	47,51%
	Refrig	164,26	245,70	28,68	135,58	82,54%	110,12	44,82%

Tabla 6. Datos para el caso de instalación fotovoltaica de 300 W.

FV = 300 W		Demanda [kWh]	Prod BC [kWh]	Demanda con FV	Aporte FV [kWh]	Fracción cubierta[%]	Pérdida [kWh]	Pérdida [%]
Base	Calefacc	2.013,67	436,69	1.812,48	201,19	9,99%	235,50	53,93%
	Refrig	429,70	516,99	92,24	337,46	78,53%	179,53	34,73%
B+W	Calefacc	1.996,63	441,19	1.793,92	202,71	10,15%	238,47	54,05%
	Refrig	424,36	511,93	90,67	333,70	78,63%	178,23	34,82%
B+W+M	Calefacc	1.964,39	490,68	1.748,83	215,56	10,97%	275,13	56,07%
	Refrig	391,01	457,78	94,51	296,50	75,83%	161,28	35,23%
PCM26	Calefacc	1.625,35	429,34	1.428,68	196,67	12,10%	232,67	54,19%
	Refrig	118,41	345,20	7,43	110,98	93,73%	234,22	67,85%
PCM29-1	Calefacc	1.156,22	304,88	1.002,85	153,37	13,27%	151,50	49,69%
	Refrig	208,04	368,55	12,92	195,12	93,79%	173,43	47,06%
PCM29-2	Calefacc	1.831,67	505,76	1.608,61	223,06	12,18%	282,71	55,90%
	Refrig	164,26	368,55	19,22	145,04	88,30%	223,52	60,65%

Como criterios de diseño a tener en cuenta, se deberían evitar los casos en los que la segunda columna (energía producida), sean mayores que la primera (demanda), ya que habrá una cantidad importante de energía excedentaria, que no se podría aprovechar ni con almacenamiento, estando marcados en rojo en las tablas 5 y 6.

Como se puede ver la potencia de diseño para los casos con MCF debería de ser inferior a 100 W mientras que para los casos sin materiales de cambio de fase debería ser inferior a 200 W. De los tres casos de estudio con morteros aditivados con MCFs destacar que el PCM29-1 es el que presenta un menor valor de energía perdida durante la refrigeración. En todos los casos las pérdidas de energía en calefacción presentan valores elevados, debido sobre todo a las épocas de entretiempo (primavera y otoño) en los que la demanda de calefacción (y refrigeración) es baja, y la producción fotovoltaica es alta.

CONCLUSIONES

El presente estudio destaca, a través de simulaciones numéricas, la importancia de incorporar MCF como estrategia para el almacenamiento de energía térmica en las soluciones constructivas de edificios, concretamente en morteros de recubrimiento interior, con vista a la termorregulación pasiva, a la eficiencia energética y a la reducción de la demanda energética del edificio para calefacción y refrigeración interior, manteniendo el confort térmico. Para eso se han modelado y simulado de manera dinámica diferentes escenarios de recubrimiento superficial interior, tomando como base las características constructivas de los demostradores a escala real y ajustando los parámetros del modelo numérico con valores obtenidos de diferentes pruebas realizadas sobre ellos, a los que se les ha aplicado una planta de climatización solar fotovoltaica de diferentes tamaños, siendo posible la obtención de criterios de diseño. Las principales conclusiones obtenidas a través del estudio son:

- Debido a la mayor producción en verano y la menor demanda, el diseño de la instalación se debe hacer teniendo en cuenta la carga de refrigeración, al ser esta la variable más crítica y en la que es más fácil que haya sobre-producción.
- Es mejor ser conservador a la hora de elegir el tamaño de la instalación, con el fin de reducir las pérdidas. Destacar que una instalación sobredimensionada lleva a una mayor inversión que no se ve amortizada ya que una parte importante de la energía se perderá. Si se quiere aumentar la fracción de carga aprovechada por la instalación fotovoltaica, se debe recurrir a sistemas de almacenamiento, con el fin de poder aprovechar los retrasos entre la producción y la demanda.
- Los recubrimientos de mortero aditivados con MCF permiten reducir la potencia fotovoltaica instalada a la mitad en el caso estudiado.
- El MCF tiene un efecto neto importante de reducción de la demanda, siendo el PCM26 el que más reducción produce en refrigeración, con una reducción de 70 %, mientras que el PCM29 Test 1 es el que mayor reducción produce en la demanda de calefacción, que corresponde a una reducción de 41 %.

Los prometedores resultados obtenidos con este estudio, son indicadores de la necesidad de continuar investigando en esta área. Así sería de interés estudiar el efecto en la demanda energética por aplicar diferentes morteros aditivados con MCF (es decir, con diferentes temperaturas de funcionamiento) en paredes con diferentes orientaciones del mismo demostrador evaluando el efecto del MCF en la reducción del consumo de energía por cambiar las horas de funcionamiento de la bomba de calor; así como comparar los resultados obtenidos en las simulaciones numéricas con los datos de comportamiento reales de los demostradores para validar los modelos.

AGRADECIMIENTOS

El trabajo se ha realizado dentro del proyecto SUDOKET - Mapeo, consolidación y diseminación de las Key Enabling Technologies (KETs) para el sector de la construcción en el espacio SUDOE, ref: SOE2/P1/E0677 que está cofinanciado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) a través del programa INTERREG SUDOE.

REFERENCIAS

Amaral, C.; Vicente, R.; Ferreira, V. M.; Silva, T. Polyurethane foams with microencapsulated phase change material: Comparative analysis of thermal conductivity characterization approaches, *Energy and Buildings* 153 (2017): 392-402. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.08.019>

Arce, P.; Medrano, M.; Gil, A.; Oró, E., F. Cabeza, L. Overview of thermal energy storage (TES) potential energy savings and climate change mitigation in Spain and Europe, *Applied Energy* 88 (2011): 2764-2774 <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.01.067>

BASF – Micronal. www.micronal.de Technical Data Sheet

www.CrodaTherm.com Technical Data Sheet ME29P.

Cunha, S.; Aguiar, J. Phase change materials and energy efficiency of buildings: A review of knowledge, *Journal of Energy Storage* 27 (2020) 101083. <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.101083>

EN 13829:2001, Thermal Performance of Buildings. Determination of Air Permeability of Buildings. Fan Pressurization Method (BS EN ISO 9972:2015). Brussels: European Committee of Standardization

Frazzica, A.; Brancato, V.; Palomba, V.; La Rosa, D.; Grungo, F.; Calabrese, L.; Proverbio, E. Thermal performance of hybrid cement mortar-PCMs for warm climates application, *Solar Energy Materials and Solar Cells* 193 (2019): 270-280. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2019.01.022>

Figueiredo, A.; Lapa, J.; Vicente, R.; Cardoso, C. Mechanical and thermal characterization of concrete with incorporation of microencapsulated PCM for applications in thermally activated slabs, *Construction and Building Materials* 112 (2016): 639-647. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.225>

Jamil, H.; Alam, M.; Sanjayan, J.; Wilson, J. Investigation of PCM as retrofitting option to enhance occupant thermal comfort in a modern residential building, *Energy and Buildings* 133 (2016): 217-229. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.09.064>

Marin, P.; Mohammed, S.; Gracia, A.; Zhu, X.; Mohammed, F.; F. Cabeza, L.; Ushak, S. Energy savings due to the use of PCM for relocatable lightweight buildings passive heating and cooling in different weather conditions, *Energy and Buildings* 129 (2016): 274-283. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.08.007>

Olivieri, L.; A. Tenorio, J.; Revuelta, D.; Navarro, L.; F. Cabeza, L. Developing a PCM-enhanced mortar for thermally active precast walls, *Construction and Building Materials* 181 (2018): 638-649. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.013>

Soares, N.; Gaspar, A.R.; Santos, P.; Costa, J.J. Multi-dimensional optimization of the incorporation of PCM-drywalls in lightweight steel-framed residential buildings in different climates, *Energy and Buildings* 70 (2014): 411-421. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.11.072>

SUDOKET: Mapeo, consolidación y diseminación de las Key Enabling Technologies (KETs) para el sector de la construcción en el espacio SUDOE (SOE2/P1/E0677). <http://sudoket.com/>

US Department of Energy, EnergyPlus; 2020. <https://energyplus.net/> [accedido en Septiembre, 2020]

<https://www.wedi.de/en/> Wedi building board Technical Data sheet.