

MODELO SIMPLIFICADO DE UN DEPÓSITO DE ALMACENAMIENTO CON PCM

BELMONTE-TOLEDO Juan F.^(1,2); EGUÍA, Pablo⁽³⁾; SALGADO, Rafael⁽⁴⁾

ALMENDROS-IBÁÑEZ, José A.^(1,2); MOLINA, Antonio^(1,2)

Juanf.Belmonte@uclm.es

⁽¹⁾ Universidad de Castilla-La Mancha, Escuela de Ingenieros Industriales de Albacete

⁽²⁾ Instituto de Investigación en Energías Renovables, Sección de Solar y Eficiencia Energética

⁽³⁾ Universidad de Vigo. Campus Lagoas-Marcosende, Departamento de Mecánica

⁽⁴⁾ Universidad Interamericana de Puerto Rico. Recinto de Bayamón

RESUMEN

Este trabajo presenta un método simplificado de modelado térmico de depósitos de almacenamiento de energía térmica con materiales de cambio de fase (PCMs) en su interior. El planteamiento desarrollado es muy similar en forma y metodología al concepto de “factor de bypass”, ampliamente utilizado en el campo de la climatización para estimar las condiciones de salida de un aire tratado cuando atraviesa una batería de acondicionamiento.

El método propuesto es capaz de reproducir la respuesta térmica de un depósito con PCMs de forma robusta y relativamente precisa, sólo empleando los parámetros más relevantes del almacenamiento (diez en total). Parámetros de entrada muy fundamentales y bien conocidos, ya en las primeras etapas de diseño, donde el impacto potencial de las decisiones tomadas en el ahorro de energía es el mayor, y en donde no es habitual un conocimiento perfecto de todas las particularidades del depósito con PCM (conocimiento preciso de la geometría del depósito e intercambiador, propiedades termofísicas del PCM en función de su temperatura, etc.). Para estas etapas preliminares de diseño de la instalación, el método es especialmente útil y adecuado.

Los resultados obtenidos de la simulación del modelo simplificado muestran un elevado grado de convergencia y exactitud con 21 ensayos experimentales de carga y descarga térmica de dos depósitos con PCMs, observándose discrepancias en el total de energía acumulada o extraída del depósito desde valores próximos al 1% hasta como máximo un 13% aproximadamente, según ensayo y material de cambio de fase. Los dos almacenamientos latentes, usaban cada uno de ellos un PCM diferente (orgánico e inorgánico), así como un tipo de intercambiador de calor diferente (de diferente geometría, configuración y material).

Palabras clave: almacenamiento de energía térmica con PCMs, simulación dinámica de instalaciones térmicas, TRNSYS®.

1. Introducción

El almacenamiento de energía térmica es necesario en cualquier aplicación donde se dé un desajuste entre la producción y demanda de energía térmica, aumentando la disponibilidad de recurso energético durante los periodos de alta demanda. Aunque un almacenamiento térmico, en sí mismo, no ahorra energía (al contrario, ya que siempre presentará alguna pérdida de calor), la flexibilidad aportada al sistema térmico resultante por su integración, es a menudo la máxima responsable del éxito de la instalación en su conjunto, al permitir el infradimensionado de los equipos generadores así como menores consumos de energía. Las energías renovables, caracterizadas por la variabilidad e intermitencia en la producción energética, han dado un nuevo valor añadido a los elementos de almacenamiento térmico, existiendo en la actualidad un gran interés en su mayor desarrollo [1].

La energía térmica puede ser almacenada, mediante un proceso físico, de tres formas distintas: en forma de calor sensible, calor latente, o mediante una combinación de ambas. La forma de almacenamiento más habitual es mediante calor sensible, variando la temperatura de una sustancia, típicamente agua. Ésta es una tecnología extremadamente madura, con una oferta prácticamente ilimitada de soluciones comerciales disponibles, que hace que las instalaciones resultantes sean más simples, fiables, económicas y fáciles de operar, que empleando cualquier otra tecnología de almacenamiento. Sin embargo, las relativamente bajas densidades energéticas alcanzables en los almacenamientos sensibles, hacen que cuando son planteadas acumulaciones de energía térmica de elevada capacidad, los depósitos requeridos resulten demasiado voluminosos, así como, con elevados espesores de aislamiento, al objeto de reducir pérdidas térmicas [2].

El almacenamiento en forma latente, ofrece la posibilidad de aumentar la densidad energética del almacenamiento, típicamente entre un factor entre 3 y 4 [3] (aunque puede llegar a ser una cuantía mayor), al contener en su interior un material que experimenta un proceso de cambio de fase. Mediante el cambio de fase de la sustancia se almacenan (o liberan) elevadas cantidades de calor latente, con pequeños cambios de temperatura (idealmente un proceso isoterma), permitiendo acumular gran cantidad de energía térmica de forma “selectiva” a temperaturas muy próximas al nivel térmico de la demanda, aumentando la densidad energética y reduciendo los requerimientos de aislamiento del almacenamiento.

La decisión de integrar o no un almacenamiento latente en un sistema térmico, debe ser sustentada por un fiable análisis de viabilidad, dado el sobre coste que produce su integración, por la necesidad de subsistemas y controles adicionales. Este análisis, además de ser suficientemente fiable, debe llevarse a cabo preferentemente en las etapas iniciales de diseño, puesto que es en ellas donde se da el mayor potencial de ahorro energético. En este sentido, existen dos aspectos clave a considerar en el desarrollo de este análisis: 1) La integración de modelos energéticos de almacenamientos latentes en entornos de simulación dinámica, como TRNSYS[®] [4] o EnergyPlus[®] [5], capaces de simular el comportamiento combinado de un sistema, es decir, de toda la instalación térmica como un único sistema integral. Este aspecto es habitualmente conseguido vía capacidades adicionales en los programas, al permitir el intercambio de datos en tiempo de simulación con otros programas externos (co-simulación), como EES[®], MATLAB[®], FLUENT[®], etc., donde es escrito el modelo térmico del almacenamiento latente, y 2) El nivel de precisión que debe poseer nuestro modelo de depósito latente, ya que los procesos de transferencia de calor asociados al cambio de fase de una sustancia son especialmente complejos, y por tanto, aquellos modelos térmicos que buscan retener todas las particularidades del proceso (histéresis, subenfriamiento, propiedades termofísicas del PCM variables en función de su temperatura, geometría detallada del depósito e intercambiador o encapsulamiento, etc.) resultan muy complejos, solicitando al diseñador un conocimiento muy detallado de numerosos parámetros de entrada para su caracterización térmica.

En la literatura pueden encontrarse diferentes trabajos, focalizados en el desarrollo de modelos térmicos detallados de depósitos con PCMs, basados en su geometría, configuración y características del intercambiador de calor (o encapsulamiento), así como de las propiedades termofísicas (densidad, viscosidad, entalpía, etc.) del material función de su temperatura y sentido del proceso (carga o

descarga, al no darse en ocasiones un comportamiento simétrico, sino con histéresis) [6-9]. Verma et al. [10] publicaron en el año 2008, una moderna y extensiva revisión del estado del arte del modelado energético de almacenamientos latentes, distinguiendo entre modelos basados en el primer principio (focalizados en un balance de entalpía) y modelos basados en el segundo principio (conforme a un enfoque basado en un balance de exergía) de la termodinámica. Una revisión más reciente y detallada de modelos latentes de almacenamientos, fue llevada a cabo por Dutil et al. [11]. En esta revisión los autores establecieron un mayor grado de subdivisión de los modelos, considerando de forma adicional aspectos de los métodos numéricos empleados en la resolución de los modelos, o el número de dimensiones espaciales (1D, 2D ó 3D) empleadas en los balances de energía, según las tipologías de almacenamiento típicas (rectangular, cilíndrica, esférica, etc.). Ambas revisiones muestran cómo los modelos térmicos de depósitos con PCMs capaces de reproducir con alta exactitud todas las particularidades de la respuesta térmica del almacenamiento, resultan modelos excesivamente complejos de caracterizar, al requerir el conocimiento preciso de un número muy elevado de parámetros de entrada (habitualmente por encima de 100). Este hecho, impone una seria barrera para una mayor implementación de modelos de almacenamientos latentes en entornos de simulación dinámica en el diseño de las instalaciones, especialmente en las etapas iniciales, donde el grado de conocimiento de todos los componentes no es perfecto.

A pesar de existir muy diversos y variados modelos térmicos de almacenamientos con PCM publicados en la literatura, muy pocos han sido los autores que han realizado su integración en un sistema térmico completo por medio de programas de simulación energética, con el objetivo de conocer el comportamiento del sistema acoplado. Ejemplos de esta integración, se encuentra en los componentes de TRNSYS[®]: *Type 840*, *Type 841* y *Type 860* [12-14], desarrollados en el marco de la Tarea 32 de la IEA-SHC [15]. Estos modelos fueron específicamente diseñados para su implementación en el programa TRNSYS[®]. Otros ejemplos de integración, los podemos encontrar en los trabajos de Jones y Finn [16, 17], donde el almacenamiento latente es escrito en MATLAB[®], e incorporado en el modelo de la instalación térmica completa en Energyplus[®], mediante la utilidad de software BCVTB[®] (Building Controls Virtual Test Bed).

En resumen, resultaría de utilidad e interés para los diseñadores de instalaciones térmicas con almacenamientos latentes, disponer de modelos térmicos de depósitos con PCMs simplificados, capaces de disminuir de forma notable la cantidad de información de entrada necesaria en la caracterización física de los modelos, focalizando dicha demanda a los parámetros más fundamentales del almacenamiento (volumen, temperatura de cambio de fase, calor latente, etc.). Parámetros fácilmente obtenibles de las características fundamentales de la instalación (nivel térmico de la demanda, duración de los ciclos de carga/descarga térmica, etc.) y de las hojas técnicas del proveedor de PCM [18, 19], sin producir una significativa pérdida de fiabilidad en los resultados, facilitando por otra parte su integración en programas de simulación dinámica, para conocer la respuesta acoplada del conjunto del sistema térmico, particularmente en los de uso más extendido en el campo de la energética edificatoria, como son Energyplus[®] y TRNSYS[®].

2. Objetivos del trabajo

El objetivo de este estudio es presentar y verificar la fiabilidad y precisión de un método simplificado basado en el concepto del *factor de bypass*, para modelar energéticamente depósitos de almacenamiento térmico con algún material de cambio de fase en su interior. Con ese propósito, el método ha sido sometido a análisis comparativos con datos experimentales obtenidos de dos almacenamientos latentes distintos, rellenos de diferentes PCMs: un material orgánico (parafina RT8 de RUBITHERM[®]) y un material inorgánico (sal hidratada: $\text{CaCl}_2 \times 6 \text{H}_2\text{O}$), usando dos intercambiadores de calor, sumergidos en el material de cambio de fase, de distintas características: el correspondiente al material orgánico, con geometría de espiral múltiple [20], usados en los trabajos de Torregrosa-Jaime et al. y López-Navarro et al. [21, 22], y el correspondiente al material inorgánico,

consistente en un intercambiador capilar con número elevado de pequeños tubos, alimentados por un colector común, usado en el trabajo de Helm. et al. [23].

3. Alcance y metodología

El método propuesto, considera que cualquier flujo de fluido caloportador que atraviesa un almacenamiento con PCM para producir su carga/descarga térmica, puede descomponerse de forma ideal en dos corrientes (Figura 1): una fracción del flujo circula por un almacenamiento de PCM de características ideales: bien mezclado, libre de resistencias térmicas, capaz de absorber (o liberar) la energía contenida en el fluido caloportador circulante de forma instantánea, y una fracción de flujo restante que es directamente conducida por un bypass a la salida, en las condiciones de entrada, no siendo afectada por el almacenamiento. Este segundo término recoge las ineficiencias en la transferencia y transporte térmico dados en un depósito real. La mezcla de ambas corrientes, reproduce de forma relativamente precisa las condiciones a la salida del almacenamiento latente.

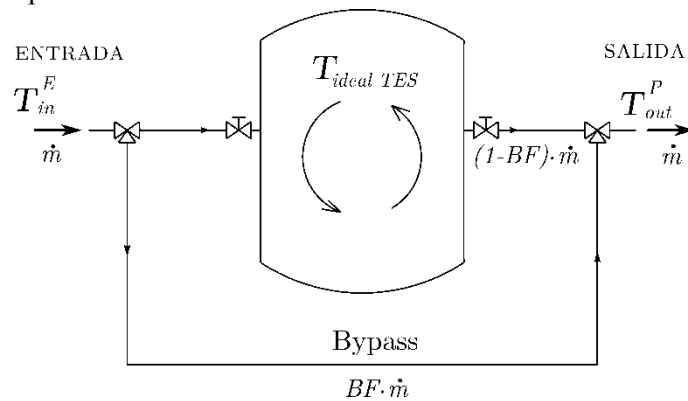


Figura 1: Esquema del método simplificado.

3.1 Modelo ideal de almacenamiento con PCM

El modelo de depósito ideal con PCM, es realizado conforme a una configuración bien mezclado, dándose un único valor de temperatura en todo el tanque, sin gradientes ni estratificación térmica en la masa de PCM. De forma adicional, el modelo ideal es capaz de acumular o liberar de forma instantánea, el máximo flujo de calor transferible entre la masa de PCM y el fluido caloportador circulante. Además considera un término de pérdidas térmicas al ambiente del emplazamiento donde se encuentre. La ecuación fundamental que gobierna el comportamiento transitorio del depósito ideal con PCM, es determinada aplicando el primer principio de la termodinámica en la unidad de tiempo al volumen de control conformado por el depósito, de acuerdo a la Ecuación (1).

$$\frac{dE(t)}{dt} \approx \frac{E(t) - E(t - \Delta t)}{\Delta t} = \dot{m}_l \cdot c \cdot (T_l(t) - T_{ideal\ TES}(t - \Delta t)) - \dot{m}_u \cdot c \cdot (T_{ideal\ TES}(t - \Delta t) - T_u(t)) - U \cdot A \cdot (T_{ideal\ TES}(t - \Delta t) - T_{room}(t)) \quad (1)$$

Donde $E(t)$ es la energía almacenada en el instante actual, y $E(t - \Delta t)$ es la energía acumulada en el instante de tiempo correspondiente al paso de simulación anterior ($t - \Delta t$). El primer término del lado derecho de la ecuación representa la potencia térmica entregada al depósito por el fluido caloportador, al encontrarse a mayor temperatura que el PCM (proceso de carga), el segundo término representa la potencia térmica extraída por el fluido caloportador con temperatura menor a la dada en el depósito (proceso de descarga), mientras que el último término representa las pérdidas térmicas del depósito al entorno donde se encuentra ubicado (ambiente exterior, una sala, etc.). Para ello se requiere del área A , de envuelta de depósito, así como del coeficiente global de pérdidas referido a dicha área U . \dot{m}_l y \dot{m}_u , corresponden con los gastos máxicos de los flujos de carga y descarga, respectivamente. El calor

específico del fluido caloportador (agua, en nuestro caso) es denotado por c_{cp} en la expresión, supuesto constante en todo el rango de trabajo.

De forma adicional, el contenido energético del almacenamiento con PCM, $E(t)$ indica el estado físico del PCM. El PCM se encuentra en estado sólido si la energía almacenada en el almacenamiento latente se encuentra por debajo del valor $E_{pcm_{min}}$, y líquido si supera el valor de $E_{pcm_{max}}$.

Encontrándose en un proceso de cambio de fase, cuando la energía almacenada se encuentra entre ambos umbrales, que son determinados conforma a las Ecuaciones (2) y (3).

$$E_{pcm_{min}} = [(1 - \varphi) \cdot V \cdot \rho_{cp} \cdot c_{cp} \cdot T_m] + [\varphi \cdot V \cdot \rho_{pcm} \cdot c_{pcm} \cdot T_m] \quad (2)$$

$$E_{pcm_{max}} = E_{pcm_{min}} + [\varphi \cdot V \cdot \rho_{pcm} \cdot h_{pcm}] \quad (3)$$

Donde φ representa la fracción volumétrica de PCM en el volumen total del depósito V . Las densidades del fluido caloportador y PCM son representadas por ρ_{cp} y ρ_{pcm} , respectivamente. c_{cp} y c_{pcm} representan los calores específicos del fluido de trabajo y el PCM (único valor para la fase líquida y sólida), respectivamente. T_m representa la temperatura de cambio de fase del PCM, con un calor latente de cambio de fase del material denotado como h_{pcm} . La fracción líquida de PCM, es obtenida conforme la Ecuación (4).

$$f = 0 \text{ si } E(t) < E_{pcm_{min}}, \quad f = 1 \text{ si } E(t) > E_{pcm_{max}} \text{ ó} \quad (4)$$

$$f = (E(t) - E_{pcm_{min}}) / (E_{pcm_{max}} - E_{pcm_{min}}) \text{ si } E_{pcm_{min}} < E(t) < E_{pcm_{max}}$$

Donde, cuando $f = 0$ todo el PCM se encuentra en estado sólido, $f = 1$ indica que todo el PCM se encuentra en estado líquido, y si $0 \leq f \leq 1$, el PCM se encuentra en un proceso de cambio de fase, siendo su temperatura constante e igual a la temperatura de cambio de fase del material (T_m). El modelo ideal de almacenamiento latente, asume que en disponibilidad suficiente de energía térmica toda la masa de PCM reacciona de forma simultánea e isoterma a la temperatura de cambio de fase T_m . En una primera aproximación, dicha temperatura puede ser seleccionada como la temperatura media del rango de cambio de fase. En materiales inorgánicos este rango es relativamente estrecho (2-4 °C), pero en materiales orgánicos suele ser más amplio (8-12 °C).

3.2 Integración del método propuesto en el entorno de simulación TRNSYS®.

La integración del método propuesto, en el entorno de simulación TRNSYS (Figura 2), se realiza por medio del componente *Type 155*, capaz de realizar un vínculo con intercambio de datos en tiempo de simulación entre TRNSYS®, donde se procedería al modelado de todo el sistema térmico a excepción del depósito ideal con PCM, y MATLAB®, donde es escrito el código del modelado térmico del depósito ideal, conforme a las ecuaciones descritas en apartados anteriores.

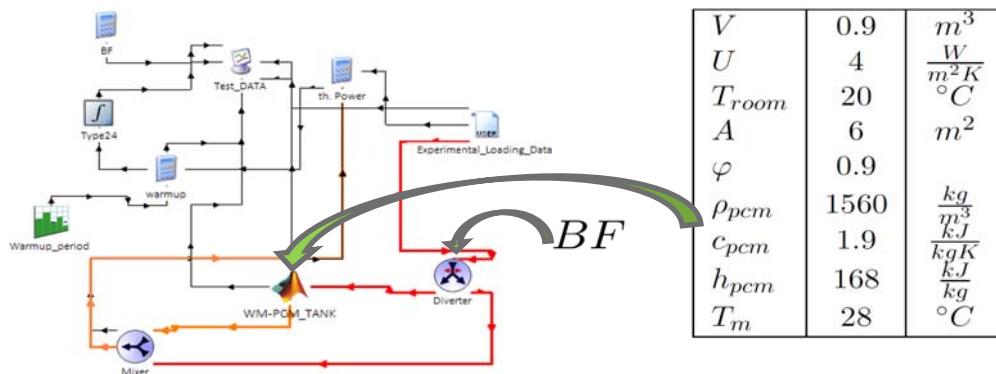


Figura 2: Esquema de implementación del método en el Simulation Studio de TRNSYS. Detalle de la definición de los diez parámetros requeridos por el método simplificado: 9 parámetros en el depósito ideal de PCM, más el parámetro del factor de bypass (BF), indicado a la válvula diversora.

El resto de componentes necesarios como la válvula diversora o mezcladora, son componentes estándar del programa. Es importante resaltar que el factor de bypass, es un parámetro indicado a la válvula diversora, y que la calibración de dicho valor, debe ser realizado convenientemente, por un programa de minimización de errores, como por ejemplo GENOPT[®], entre la salida del método y datos experimentales.

4. Resultados obtenidos

Se ha procedido a realizar un análisis comparativo de los resultados producidos por nuestro método simplificado con datos experimentales de 21 ensayos. 19 de ellos correspondientes al depósito relleno de sal hidratada ($\text{CaCl}_2 \times 6 \text{H}_2\text{O}$) y 2 de ellos con parafina (RUBITHERM-RT8). La Tabla 1, contiene los resultados de los parámetros de ajuste más representativos obtenidos, observándose un alto grado de concordancia, particularmente para el material inorgánico, dada su alta conductividad térmica.

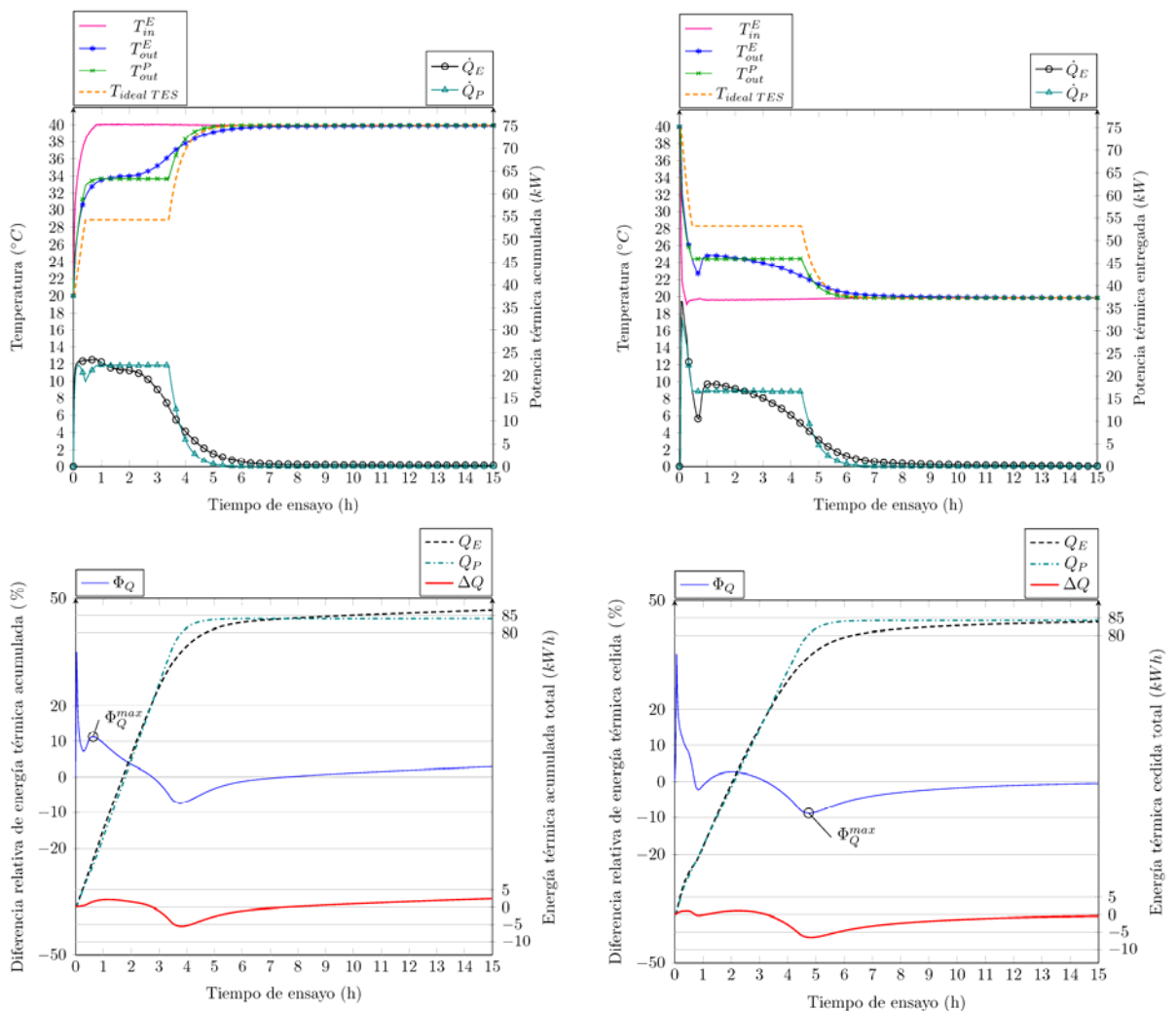


Figura 3: Respuesta térmica prevista por el método y experimentalmente medida para el depósito con PCM inorgánico (sal hidratada: $\text{CaCl}_2 \times 6 \text{H}_2\text{O}$). Ensayo de carga, con temperatura inicial de 20 °C y consigna 40 °C. Ensayo de descarga, con temperatura inicial de 40 °C y consigna de 20 °C. (E denota ensayo experimental, mientras que P estimado por el método).

El modelado del depósito con parafina presenta como dificultad añadida, el fenómeno de que toda la masa de PCM no llega a reaccionar en el ensayo, luego el valor de masa introducida al modelo resulta sobredimensionada, debe corregirse este efecto vía experimental, ya que de antemano resulta complejo conocer cuál es el material que reacciona de forma efectiva, así por ejemplo en el ensayo de 1450 kg, por ineficiencias en la transferencia de calor agudizadas por la baja conductividad térmica de la parafina, sólo reaccionan 1007 kg (aproximadamente un 70 % de la masa total).

5. Conclusiones y consideraciones finales

Los resultados producidos por el método simplificado muestran un alto grado de concordancia con los datos experimentales, particularmente con los ensayos correspondientes al depósito con sal hidratada. Esto es debido al mejor comportamiento del material inorgánico en términos de mayor conductividad térmica con un cambio de fase casi isoterma. Aspectos como la histéresis o el subenfriamiento, típicos de materiales inorgánicos, han revelado un impacto menor sobre la bondad del ajuste. El mayor grado de discrepancia, se da con los materiales orgánicos por su menor conductividad térmica y mayor intervalo de cambio de fase, particularmente cuando estos materiales son empleados en depósitos de acumulación de hielo (como los depósitos CALMAC[®]), ya que las distancias donde se establece el flujo de calor, pueden ser demasiado grandes, produciéndose (a no ser que los ensayos sean demasiado extensos de tiempo) zonas muertas, donde el PCM no reacciona. La estimación de estos volúmenes muertos es complejo y requiere ensayo experimental para implementarlo en el modelo.

Tabla 1: Valores de los parámetros de ajuste obtenidos usando GENOPT[®], utilizando como variable a optimizar BF_{opt} , en los ensayos de carga y descarga térmica del depósito con sal hidratada. Donde $EMC_{T_{out}}$ es el error medio cuadrático acumulado en la temp. de salida, $\phi_{T_{out}}^{EMC}$ el error medio cuadrático relativo acumulado de la temp. de salida, $\Delta Q(t_{end})$ diferencia de energía acumuladas al final del ensayo y $\phi_{\Delta Q(t_{end})}$ la diferencia relativa.

Ensayo de carga térmica ($T_m = 28\text{ °C}$)

$T_i \rightarrow T_c$	BF_{opt}	EMC_{Tout}	ϕ_{Tout}^{EMC}	$\Delta Q(t_{end})$	$\phi_{\Delta Q(t_{end})}$	ϕ_Q^{max}
[°C → °C]	[-]	[°C]	[%]	[kWh]	[%]	[%]
24 → 32	0.5194	0.4410	5.513	3.332	4.782	-24.032
24 → 34	0.4875	0.4623	4.623	0.708	0.956	-19.583
24 → 36	0.4788	0.4511	3.759	0.249	0.326	-18.441
24 → 38	0.4700	0.4659	3.328	-0.056	-0.072	-17.982
24 → 40	0.4694	0.4711	2.944	-0.205	-0.255	-18.155
20 → 32	0.5069	0.4649	3.874	1.766	2.351	-20.682
20 → 34	0.4813	0.5139	3.671	-1.381	-1.725	-16.382
20 → 36	0.4756	0.5248	3.280	-1.807	-2.197	-15.101
20 → 38	0.4706	0.5416	3.009	-2.205	-2.611	-14.534
20 → 40	0.4688	0.5480	2.740	-2.522	-2.914	-14.393

Ensayo de descarga térmica ($T_m = 28\text{ °C}$)

$T_i \rightarrow T_c$	BF_{opt}	EMC_{Tout}	ϕ_{Tout}^{EMC}	$\Delta Q(t_{end})$	$\phi_{\Delta Q(t_{end})}$	ϕ_Q^{max}
[°C → °C]	[-]	[°C]	[%]	[kWh]	[%]	[%]
32 → 24	0.3856	0.5016	6.2702	6.770	10.190	17.940
34 → 24	0.3900	0.4798	4.7982	4.542	6.449	14.321
36 → 24	0.3925	0.4949	4.1239	4.141	5.703	16.351
38 → 24	0.3938	0.4908	3.5060	3.848	5.151	12.875
32 → 20	0.4244	0.5688	4.7397	3.909	5.345	13.383
34 → 20	0.4288	0.5456	3.8975	2.075	2.704	10.883
36 → 20	0.4250	0.5511	3.4447	1.500	1.896	10.592
38 → 20	0.4263	0.5583	3.1017	1.186	1.461	10.081
40 → 20	0.4300	0.5561	2.7806	0.390	0.466	8.590

Tabla 2: Valores de los parámetros de ajuste obtenidos con GENOPT[®], en los ensayos de carga y descarga térmica del depósito con parafina. Masa de PCM corregida de 1450 a 1007 kg efectivos.

Ensayo de carga térmica ($T_m = 7\text{ °C}$)						
$T_i \rightarrow T_c$	BF_{opt}	$EMC_{T_{out}}$	$\phi_{T_{out}}^{EMC}$	$\Delta Q(t_{end})$	$\phi_{\Delta Q(t_{end})}$	ϕ_Q^{max}
[°C → °C]	[-]	[°C]	[%]	[kWh]	[%]	[%]
-1 → 14	0.3125	1.1121	8.6356	8.439	12.945	41.67
Ensayo de descarga térmica ($T_m = 7\text{ °C}$)						
$T_i \rightarrow T_c$	BF_{opt}	$EMC_{T_{out}}$	$\phi_{T_{out}}^{EMC}$	$\Delta Q(t_{end})$	$\phi_{\Delta Q(t_{end})}$	ϕ_Q^{max}
[°C → °C]	[-]	[°C]	[%]	[kWh]	[%]	[%]
15 → 1	0.4225	1.2750	8.5607	5.062	8.113	49.390

6. Agradecimientos

Los autores están especialmente agradecidos a los doctores Jorge Payá Herrero del Instituto de Ingeniería Energética de Valencia y Martin Helm del ZAE Bayern, por proporcionarnos los datos experimentales de varios procesos de carga y descarga de sus almacenamientos latentes. Estos ensayos han permitido a los autores la validación del método.

7. Referencias

- [1] Dincer, I. y Rosen, A. *Thermal Energy Storage: Systems and Applications*, John Wiley & Sons Ltd, 2º ed., 2011.
- [2] Xu, J., Wang, R. y Li, Y. *A review of available technologies for seasonal thermal energy storage*. Solar Energy, 2014, vol. 103, pp. 610-638.
- [3] Mehling, H. y Cabeza, L.F. *Heat and cold storage with PCM*, SPRINGER, 2008.
- [4] Klein, S., Beckman, W. y Mitchell, J. *TRNSYS 17. aTRaNsient System Simulation program*. Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison. 2010.
- [5] DOE-Department of Energy. U.S. *EnergyPlus 8.2. Energy Simulation Software*. 2015. Disponible en: <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/> [Consulta: 10 Marzo 2015]
- [6] Farid, M. y Kanzawa, A. *Thermal performance of a heat storage module using pcm's with different melting temperatures: Mathematical modeling*. Journal of Solar Energy Engineering, Transactions of the ASME, 1989, vol. 111, pp. 152-157.
- [7] Costa, M., Oliva, A. y Pérez-Segarra, C. D. *Three-dimensional numerical study of melting inside an isothermal horizontal cylinder*. Numerical Heat Transfer, Part A: Applications. 1997, vol. 32, pp. 531-553.
- [8] Vakialtojar, W. y Saman, W. *Analysis and modelling of a phase change storage system for air conditioning applications*. Applied Thermal Engineering. 2001, vol. 21, pp. 249-263.
- [9] Bony, J. y Citherlet, S. *Numerical model and experimental validation of heat storage with phase change materials*. Energy and Buildings. 2007, vol. 39, pp. 1065-1072.
- [10] Verma, P., Varun, S., Singal, K. *Review of mathematical modeling on latent heat thermal energy storage systems using phase-change material*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2008, vol. 12, pp. 999-1031.
- [11] Dutil, Y., Rousse, D. R., Salah, N. B., Lassue, S. y Zalewski, L. *A review on phase-change materials: Mathematical modeling and simulations*. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2011, vol. 15, pp. 112-130.

- [12] Bony, J. y Cithélet, S. *Comparison between a new trnsys model and experimental data of phase change materials in a solar combisystem*. IBPSA – International Building Performance Simulation Association. 2007, pp. 371-378.
- [13] Puschnig, P., Heinz, A. y Steicher, W. *Trnsys simulation model for an energy storage for pcm slurries and/or pcm modules*. 2nd Conference on Phase Change Materials & Slurry: Scientific Conference & Business Forum. 2005. Yverdon-les-Bains. Suizaria.
- [14] Schranzhofer, H., Puschnig, P., Heinz, A. y Streicher, W. *Validation of a trnsys simulation model for pcm energy storages and pcm wall construction elements*. 10th International Conference on Thermal Energy Storage - ECOSTOCK. 2006. USA.
- [15] IEA-SHC. *Simulation models of PCM storage units, Technical Report, A report of the International Energy Agency, Solar Heating and Cooling Programme – TASK 32*. 2008.
- [16] Jones, A. y Finn, D. *Ground source heat pump modelling with thermal storage simulation and integration issues in Energyplus*. IBPSA – International Building Performance Simulation Association. 2013.
- [17] Jones, A. y Finn, D. *PCM thermal storage system analysis using Energyplus and BCVTB*. IBPSA – International Building Performance Simulation Association. 2014.
- [18] PCM. Phase change material products limited. *PLUSICE*. Disponible en: <http://www.pcmproducts.net/> [Consulta: 10 Marzo 2015].
- [19] RUBITHERM, phasechangematerials. Disponible en: <http://www.rubitherm.de/> [Consulta: 10 Marzo 2015].
- [20] CALMAC. Icebanks. Energy storagetanks. Disponible en: <http://www.calmac.com/> [Consulta: 11 Marzo 2015].
- [21] Torregrosa-Jaime, B., López-Navarro, A., Corberán, J. M., Estaban-Matías, J.C., Klinkner, L. y Payá, J. *Experimental analysis of a paraffin-based coldstoragetank*. International Journal of Refrigeration. 2013, vol. 36, pp. 1632-1640.
- [22] López-Navarro, A., Biosca-Taronger, J., Corberán, J. M., Peñalosa, A., Lázaro, A., Dolado, P. y Payá, J. *Performance characterization of a pcmstoragetank*. Applied Energy. 2014, vol. 119, pp. 151-162.
- [23] Helm, M., Keil, C., Hiebler, S., Mehling, H. y Schweigler, C. *Solar heating and cooling system with absorption chiller and low temperature latent heat storage: Energetic performance and operational experience*. International Journal of Refrigeration, 2009, vol. 32, pp. 596-606.