

CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DE LA RESPUESTA TÉRMICA DE UN DEPÓSITO DE 100 LITROS PARCIALMENTE LLENO CON DIFERENTES PCM A UNA DEMANDA TÉRMICA INTENSA

MIGUEZ TABARÉS, José Luis ⁽¹⁾; PORTEIRO FRESCO, Jacobo ⁽¹⁾; CRESPO SANJURJO, Bárbara ⁽¹⁾; PATIÑO VILAS, David ⁽¹⁾; EGUÍA OLLER, Pablo ⁽¹⁾

jmguez@uvigo.es

⁽¹⁾Universidad de Vigo, Escuela de Ingeniería Industrial, Departamento de Máquinas y Motores Térmicos.

RESUMEN

La incorporación de materiales de cambio de fase (PCM) con el fin de mejorar el almacenamiento de energía térmica en diferentes aplicaciones es un tema de estudio en la actualidad, en particular para la acumulación de agua caliente sanitaria. Con el fin de evaluar el comportamiento de estos materiales se diseñó y construyó una instalación experimental aplicada en este caso al estudio de un depósito de 100 litros. Los PCM utilizados para este trabajo son tres tipos de sales hidratadas: DC58, PT58 y HD60. Se desarrolló una metodología experimental para comparar y estudiar la contribución de energía de estos materiales, utilizando un primer ensayo sin PCM como escenario de referencia. Se observa una mejora en el almacenamiento de energía térmica cuando se utilizan estos materiales. Cuando el material de cambio de fase PT58 es ensayado, se mide una temperatura de agua aproximadamente 4° C superior que en el ensayo de referencia. Con las mismas características, en el caso del material de cambio de fase DC58, la temperatura del agua sólo se ve aumentada en alrededor de 1.5° C. Para el material de cambio de fase HD60, la cantidad introducida fue del 45% de la cantidad de PT58, alcanzando una diferencia de 2.4° C en comparación con el ensayo de referencia en capas superiores y de 1.3° C en capas inferiores.

Asimismo, se analiza el efecto por kg de PCM y se lleva a cabo un análisis de energía demostrando el efecto del método de encapsulado en la energía liberada así como se muestra la cantidad de energía de PCM perdida.

Palabras clave: Materiales de cambio de fase, depósito acumulador, experimental.

1. Introducción

El almacenamiento de energía térmica es un método de almacenamiento frecuentemente relacionado con el desajuste entre aporte de energía térmica y demanda de energía. Debido a su importancia en aplicaciones industriales y domésticas se trata de un tema que está siendo actualmente estudiado. Una de las tecnologías utilizadas para el almacenamiento de energía térmica son los depósitos de acumulación [1]. Su función es acumular agua caliente para uso doméstico. Algunas de sus ventajas son la reducción de la energía de producción, así como la obtención de un funcionamiento más homogéneo.

Algunos temas relacionados con el almacenamiento de energía térmica y depósitos de acumulación han sido ya estudiados y demostrados, como puede ser el fenómeno de estratificación del agua dentro del depósito [2, 3, 4]. Otros investigadores focalizaron su estudio en la mejora del fenómeno de estratificación en el interior del depósito.

Por otro lado, el uso de materiales de cambio de fase como método de mejora de la capacidad de almacenamiento de energía térmica está siendo una cuestión de estudio en la actualidad. Se basa en reducir el consumo de energía gracias a la gran capacidad de almacenamiento de calor y al comportamiento isotérmico de estos materiales [5, 6]. Los PCMs (*phase change materials*) tienen la capacidad de cambiar de estado (de sólido a líquido y viceversa) a temperatura constante, almacenando y liberando grandes cantidades de energía. Son clasificados como unidades de almacenamiento de calor latente (LHS, *latent heat storage*).

L. F. Cabeza et al. [7] llevaron a cabo una investigación experimental en una planta solar piloto llegando a la conclusión de que la inclusión de PCM en depósitos de acumulación permite disponer de agua caliente durante mayores periodos de tiempo. La misma idea fue investigada por H. Mehling et al. [8] concluyendo que estos materiales compensan la pérdida de calor en la capa superior del depósito. Farid et al. [9] demostró experimentalmente el incremento de la capacidad de almacenamiento de energía térmica en un depósito de agua caliente doméstico con una capacidad de 180 litros al introducir un total de 57 tubos de PVC que contenían material de cambio de fase en su interior. Un código para la simulación numérica fue desarrollado y validado por Gracia et al. [10] a partir de estos datos experimentales.

La importancia de seleccionar el material de cambio de fase adecuado en función de sus propiedades y su encapsulado también ha sido un tema de interés por parte de otros autores. Nuytten [11] concluyeron que el PCM en tubos tenía una respuesta mejor a potencias térmicas bajas mientras que era más adecuado el uso de cápsulas para potencias térmicas elevadas. Otro estudio experimental y numérico desarrollado por Wei et al. [12] se basa en el estudio de cuatro tipos diferentes de PCMs.

El presente trabajo tiene como objetivo estudiar el comportamiento de tres materiales de fase diferentes en un depósito acumulador a través de una serie de ensayos simulando demandas de consumo reales. Los materiales estudiados tienen similares temperaturas de fusión pero distintas capacidades de almacenamiento de calor y formas y tamaños de encapsulado. Para llevar a cabo este estudio, se diseñó y se construyó una instalación experimental.

2. Método de trabajo

2.1. Descripción de la instalación

En la Universidad de Vigo se diseña y construye una instalación experimental para analizar el comportamiento de diferentes materiales de cambio de fase. Los componentes principales de esta instalación son un depósito de inercia acumulador con un volumen de 500 litros que garantiza unos valores de temperatura elevados durante los ensayos, y un depósito de ensayo con un volumen de 100 litros donde se introducen los diferentes materiales de cambio de fase investigados. El agua en el interior del depósito acumulador se calienta a partir de una caldera de biomasa de 60 kW, y como medida adicional se han instalado seis resistencias eléctricas a este depósito. La instalación consta también de las válvulas, bombas y dispositivos de medición necesarios, así como de un sistema de

adquisición de datos. Con estos componentes se asegura el control y la buena ejecución de los experimentos. La Fig. 1 muestra un esquema de esta instalación.

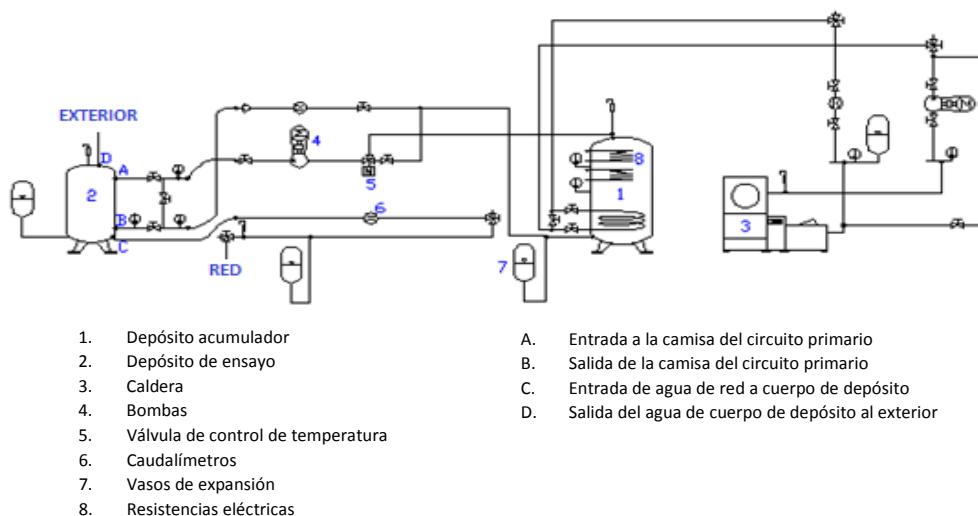


Figura 1: Esquema de la instalación.

La instalación consiste principalmente en dos circuitos independientes, uno de calentamiento del depósito de ensayo a través de la camisa de éste y otro de enfriamiento a través del serpentín interior. El circuito de calentamiento o circuito primario es un circuito cerrado por el que el agua circula desde el depósito acumulador a la camisa del depósito de ensayo. Varios caudalímetros, sensores de temperatura y una válvula de tres vías controlan los caudales y temperaturas que circulan por este circuito.

El circuito de enfriamiento es un circuito abierto por el que agua procedente de la red se hace circular por el serpentín interior del depósito de ensayo perdiéndose al ambiente exterior. En este caso se ha utilizado una alternativa al enfriamiento consistente en introducir el agua de red directamente al cuerpo del depósito de ensayo mediante una entrada inferior, de forma que el agua en el interior de éste es reemplazada por la nueva agua introducida abandonando el depósito de ensayo por una salida en su parte superior.

2.2. Descripción del depósito de ensayo

El depósito de ensayo tiene una capacidad de 100 litros y está hecho de acero al carbono. Consta de un serpentín de enfriamiento con 11 espiras y una camisa para el calentamiento. Existen por lo tanto tres dominios de agua: el interior del serpentín donde se produce el agua caliente sanitaria (ACS), el agua de la camisa responsable del calentamiento del depósito, y el agua que se encuentra en el cuerpo del depósito. La tapa dispone de dos vainas de temperatura donde se introducen Pt-100 para medir y controlar las temperaturas en el interior del depósito. Se usan un total de cuatro Pt-100 dispuestas a distintas alturas.

Puede verse un esquema con las dimensiones y una fotografía del depósito en la Fig. 2.

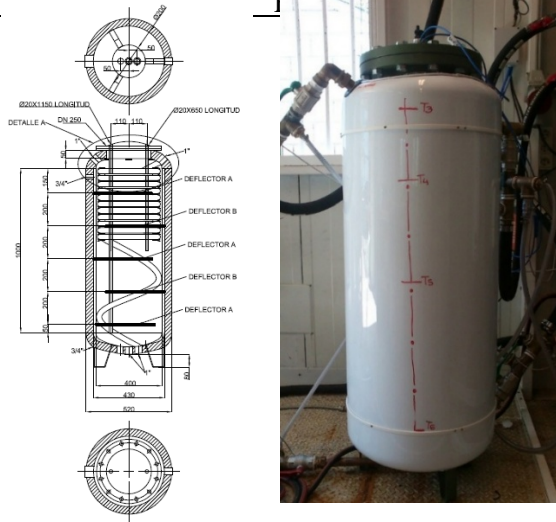


Figura 2: Esquema con las dimensiones y fotografía del depósito de ensayo.

2.3. Materiales de cambio de fase experimentados

Se prueban tres tipos diferentes de materiales de cambio de fase mostrados en la Fig. 3. Todos ellos son sales hidratadas con diferentes propiedades. El primero de ellos (DC58) son sales hidratadas encapsuladas con una temperatura de cambio de fase entre 58 y 61 °C y una capacidad de almacenamiento de calor de 120 kJ/kg. Sus dimensiones tienen una longitud de 30 mm y diámetro de 2 mm. El segundo tipo (PT58) son también sales hidratadas con una temperatura de cambio de fase de 58 °C y una capacidad de almacenamiento de calor de 237 kJ/kg y unas dimensiones de 20 mm de longitud y diámetro de 2.5 mm. Por último, se experimenta con sales hidratadas microencapsuladas (HD60) con una temperatura de cambio de fase en el intervalo entre 50 y 60 °C y una capacidad de almacenamiento de calor de 160 kJ/kg. Su aspecto es como el de una malla con múltiples agujeros de 1 mm de diámetro y 0.3 mm de espesor en los que se encuentra el material de cambio de fase. Los porcentajes de material de cambio de fase/material de encapsulado de cada uno de los PCMs experimentados son 84%/16%, 81%/19% y 76%/24% respectivamente.

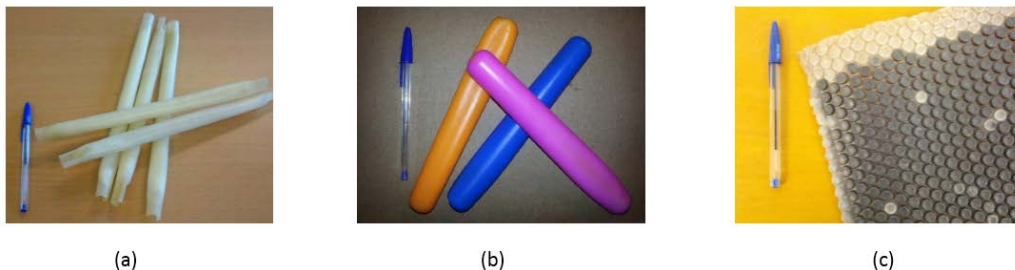


Figura 3: Materiales de cambio de fase ensayados. (a) Sales hidratadas encapsuladas DC58, (b) Sales hidratadas encapsuladas PT58, (c) Sales hidratadas microencapsuladas HD60.

2.4. Metodología de ensayo

Se desarrolla una metodología de ensayo para analizar la contribución de los PCMs tras haber llevado a cabo una serie de ensayos preliminares. Esta metodología consta de un total de cuatro fases.

La primera fase consiste en el calentamiento del depósito de ensayo a través de la camisa al hacer circular el agua precalentada del depósito acumulador por el circuito primario. Un caudal de agua determinado fluye desde la parte superior del depósito acumulador a la camisa del depósito de ensayo. Parte del caudal de agua que sale de la camisa es recirculado. El caudal restante es devuelto al depósito acumulador creando así un circuito cerrado. El final de esta etapa viene dado al alcanzar una cierta temperatura del agua en el depósito de ensayo. Se debe asegurar con esta fase la fusión completa de los PCM. Teniendo en cuenta que las temperaturas de fusión de los materiales ensayados se encuentran entre 50 y 60 °C, el depósito de ensayo será calentado hasta 80 °C.

La segunda fase consiste en estabilizar las temperaturas alcanzadas. Para ello se mantiene en estático el depósito durante media hora. La tercera etapa consiste en un enfriamiento rápido del depósito. Un

caudal de 1140 l/h de agua de red se introduce a cuerpo de depósito desplazando el agua que contenía en su interior. La duración de esta etapa se ha establecido en 14 minutos. La cuarta y última fase consiste en continuar con la adquisición de datos durante horas tras el fin de la etapa de enfriamiento, permitiendo analizar el comportamiento de los diferentes materiales de cambio de fase. Cuatro Pt-100 distribuidos a diferentes alturas registran la temperatura del agua en el depósito de ensayo (T_1 - T_4).

Siguiendo con la metodología explicada, en este estudio se presentan cuatro ensayos mostrados en la Tabla 1. El primero se utiliza como ensayo de referencia al haber sido realizado sin material de cambio de fase. Los tres restantes se realizan con los tres materiales estudiados.

Tabla 2: Ensayos realizados.

Ensayo	Tipo de PCM	Masa PCM+encapsulado (kg)	Masa de PCM (kg)
1 (referencia)	-	-	-
2	DC58	36.8	31
3	PT58	37.3	30.2
4	HD60	18.2	13.8

3. Resultados alcanzados

3.1. Estructura térmica del depósito

Se considera que los cuatro ensayos parten de condiciones muy similares, registrándose temperaturas de comienzo de ensayo prácticamente iguales.

Las gráficas a continuación muestran la progresión de los valores de temperatura en el depósito de ensayo durante la duración de éste. La primera gráfica (Fig. 4) muestra las temperaturas correspondientes con el sensor a altura superior (T_1). Las temperaturas alcanzadas en la parte superior del depósito muestran los valores más altos debido a la estratificación en el depósito. En el eje de abscisas se representa el tiempo de ensayo y comienza a partir del final de la primera etapa, pudiendo observarse la segunda, tercera y cuarta etapas.

El zoom A muestra la segunda etapa, de estabilización de temperaturas. Tras esta etapa se observa una rampa empinada en la que la temperatura en el interior del depósito se reduce de aproximadamente 80 °C a entorno los 41 °C. Esto se corresponde con la tercera etapa, de enfriamiento. El zoom B, escogido inmediatamente a continuación del final de esta etapa, muestra el efecto de los materiales de cambio de fase. Como podía esperarse, se observa una curva prácticamente horizontal en el ensayo de referencia mientras que puede verse una cierta recuperación de temperaturas en el resto de ensayos debido a la tardía transición de parte del material de cambio de fase.

La cuarta fase refleja el progreso de la temperatura del depósito de ensayo tras el proceso de enfriamiento. Aunque se observa una disminución de las temperaturas en todos los ensayos, en el caso del ensayo realizado con HD60 se registra un gradiente negativo menor.

Teniendo en cuenta que las pérdidas al ambiente y las temperaturas en el depósito de ensayo al comienzo de éste son aproximadamente las mismas en todos los casos, el comportamiento de estos materiales puede representarse por la temperatura alcanzada al final del ensayo. El zoom C muestra estas temperaturas finales. Se observa que la temperatura más baja se alcanza para el ensayo de referencia, mientras que la más elevada se obtiene en el caso del PT58, 3.8 °C superior al de referencia. La segunda temperatura de agua más elevada alcanzada se registra para el HD60, siendo 2.4 °C mayor que en el caso de referencia, y por último para el DC58, 1.4 °C mayor. Debe tenerse en cuenta que la cantidad de material en cada ensayo no es la misma.

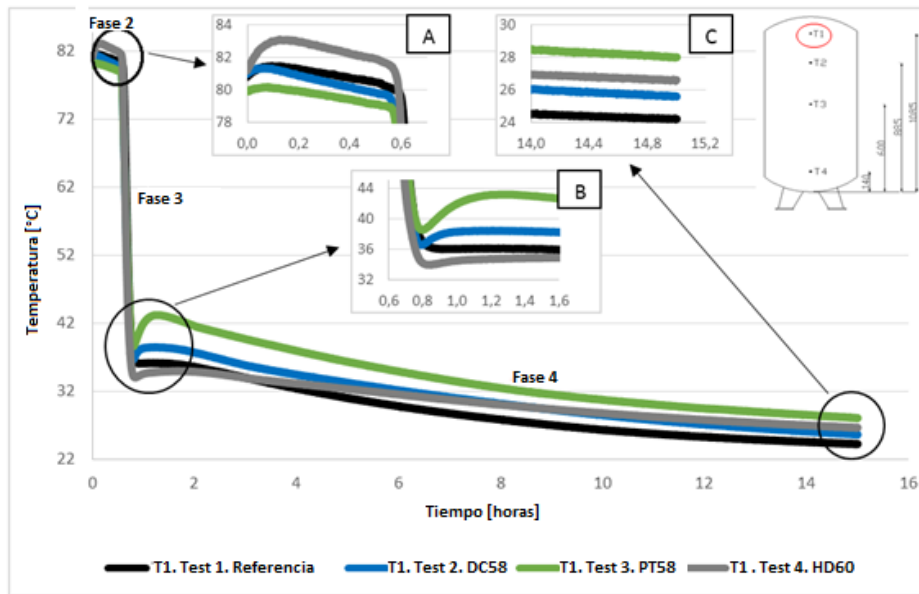


Figura 4: Temperatura del agua a altura superior (T1) en el depósito de ensayo durante el ensayo

Debido a la estratificación que se crea en el interior del depósito y debido a que la salida del agua caliente tiene lugar por la parte superior de éste, T₁ se convierte en la temperatura más importante a estudiar y, por lo contrario, T₄ es la menos importante. Del mismo modo, se desarrolló un estudio del progreso de las otras tres temperaturas T₂, T₃ y T₄, que por el motivo anteriormente descrito y debido a la brevedad del artículo no se entrará a detallar. La Fig. 5 muestra el progreso de las temperaturas a lo largo del ensayo correspondiente con las dos Pt-100 situadas a las alturas centrales.

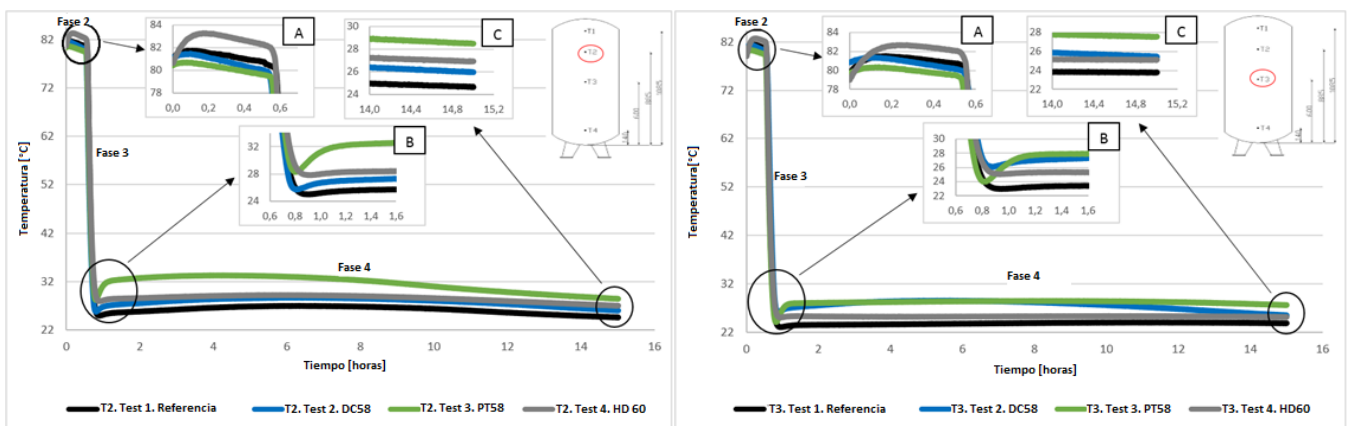


Figura 5: Temperatura del agua a altura media superior (T₂) y media inferior (T₃) en el depósito de ensayo durante el ensayo

A partir de la gráfica anterior puede observarse que para el sensor T₂ de nuevo se obtiene un mejor resultado en el caso del PT58, siendo la temperatura alcanzada al final del ensayo en este caso 3.9 °C mayor que para el ensayo de referencia. A continuación le sigue el ensayo realizado con HD60, obteniendo una temperatura 2.3 °C mayor que para el caso de referencia, y por último 1.4 °C mayor para el ensayo con el DC58. Resultados similares se obtienen para el sensor T₃.

Con el fin de llevar a cabo una comparativa más precisa del efecto que provoca la inclusión de estos PCM en el depósito de ensayo, se analiza el aumento de temperatura con respecto al ensayo de referencia por kg de PCM introducido. La Tabla 2 muestra estos resultados para los dos termopares situados en la parte superior del depósito por tratarse de los puntos más representativos. Como puede observarse, al introducir un kg de DC58 se logra un pequeño aumento de temperatura, siendo este PCM el que tiene una capacidad de almacenamiento menor. Por lo contrario, con un kg de PT58 o

HD60, materiales con una mayor capacidad de almacenamiento de calor, el aumento de temperatura conseguido es mayor.

Tabla 3: Estimación del aumento de la temperatura a dos alturas en el depósito de ensayo por kg de PCM añadido.

Termopar/PCM	DC58	PT58	HD60
T ₁	0.27 °C	0.76 °C	0.80 °C
T ₂	0.22 °C	0.63 °C	0.61 °C

3.2. Análisis energético

Tras la severa demanda térmica a la que se somete al depósito de ensayo, parte del PCM aún se encuentra en fase líquida mientras que la mayor parte ya se solidificó durante esta etapa. Con el fin de determinar la cantidad de PCM que permanece líquido tras esta etapa de enfriamiento se hace un balance de energía. Para ello el depósito es dividido en cuatro capas y se asumen una serie de hipótesis.

Se calcula la energía total, como suma de la energía que aporta el agua, el material de cambio de fase y debida a las pérdidas al ambiente en tres instantes a lo largo del ensayo. Fig. 6 muestra estos resultados.

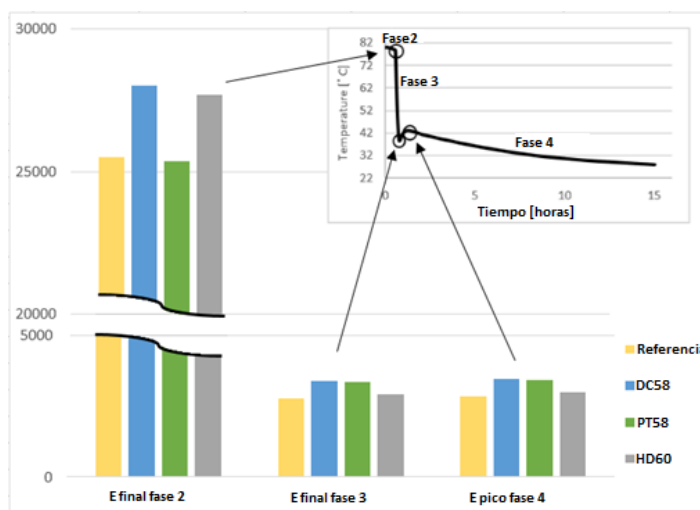


Figura 6: Resultados del análisis de energía global

Como puede verse en la gráfica anterior, la energía al final de la fase 3 y en el pico de la fase 4 es la misma debido a que el depósito se mantiene aislado entre estos instantes de ensayo. Ésta es la base para estimar el retraso térmico de los materiales de cambio de fase.

Tras calcular experimentalmente los valores UA en cada una de las capas en las que ha sido dividido el depósito, los resultados del balance muestran que el material PT58 experimenta el proceso de solidificación más lento, manteniéndose un 9.80% de material en estado líquido tras el rápido enfriamiento, seguido del material DC58 con un 5.46%. En el caso del material HD60 tan sólo un 2.80% permanece en estado líquido. Esto se debe al tipo de encapsulado de cada PCM. Los materiales PT58 y DC58 son materiales macroencapsulados. Su encapsulado es similar, con un porcentaje mayor de cápsula en el caso del primero, por lo que muestra una mayor barrera en el proceso de solidificación como puede comprobarse en los resultados presentados. Por el contrario, el HD60, por ser microencapsulado, tiene una gran superficie en contacto con el fluido en el interior del depósito, lo que explica que una mayor cantidad de material se haya solidificado durante la etapa de enfriamiento.

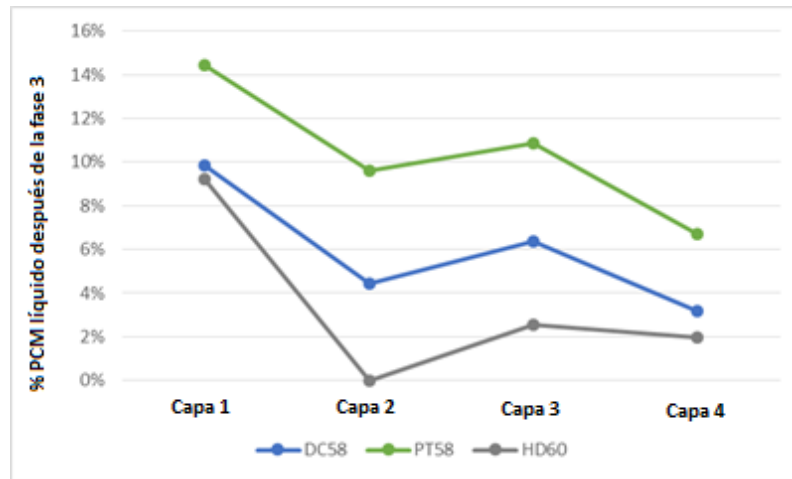


Figura 7: Porcentaje de PCM líquido tras la etapa de enfriamiento

4. Conclusiones y consideraciones finales

El presente trabajo estudia la mejora en el almacenamiento de energía térmica en un depósito de agua caliente de 100 litros debido a la incorporación de diferentes PCM. Se llevan a cabo cuatro ensayos. El primero no incluye material de cambio de fase sirviendo como ensayo de referencia. En el segundo se incluyen 31 kg de sales hidratadas encapsuladas DC58, en el tercero 30.2 kg de sales hidratadas encapsuladas PT58 y en el cuarto 13.8 kg de sales hidratadas microencapsuladas HD60.

Tras una metodología de ensayo en la que el agua en el interior del depósito es desplazada por agua introducida a cuerpo de depósito directamente de la red y a través de la señal registrada por cuatro Pt-100 a diferentes alturas, se evalúa y compara el comportamiento térmico de los PCMs.

Mediante un análisis de energía se muestra el efecto de tipo de encapsulado en el proceso de solidificación, concluyendo que éste es más lento en el caso de los materiales encapsulados (DC58 y PT58) y más rápido para el material microencapsulado (HD60).

Tras la intensa demanda térmica, el porcentaje de material que ayudó en la respuesta térmica fue 94.54%, 90.20% y 97.20% para DC58, PT58 y HD60 respectivamente, por lo que dependiendo del propósito de la introducción de material de cambio de fase, el retraso térmico se puede considerar deseable o no.

5. Agradecimientos

Los autores desean agradecer la financiación recibida a través del programa de apoyo a Grupos de Referencia Consolidados de la Xunta de Galicia.

6. Referencias

- [1] FANINGER, G. *Thermal Energy Storage*. Faculty for Interdisciplinary Research and Continuing Education, IFF-University of Klagenfurt, Austria, 2004.
- [2] GARCÍA-MARÍ, E. *A New Inlet Device that Enhances Thermal Stratification during Charging in a Hot Water Storage Tank*. *Applied Thermal Engineering*, 2013, vol. 61, no. 2. pp. 663-669.
- [3] SHIN, M. *Numerical and Experimental Study on the Design of a Stratified Thermal Storage System*. *Applied Thermal Engineering*, 2004, vol. 24, no. 1. pp. 17-27.

- [4] HALLER, M Y. *Methods to Determine Stratification Efficiency of Thermal Energy Storage Processes—review and Theoretical Comparison*. Solar Energy, 2009, vol. 83, no. 10. pp. 1847-1860.
- [5] SHARMA, A. *Review on Thermal Energy Storage with Phase Change Materials and Applications*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009, vol. 13, no. 2. pp. 318-345.
- [6] ZALBA, B. *Review on Thermal Energy Storage with Phase Change: Materials, Heat Transfer Analysis and Applications*. Applied Thermal Engineering, 2003, vol. 23, no. 3. pp. 251-283.
- [7] CABEZA, L. F. *Experimentation with a Water Tank Including a PCM Module*. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2006, vol. 90, no. 9. pp. 1273-1282.
- [8] MEHLING, H. *PCM-Module to Improve Hot Water Heat Stores with Stratification*. Renewable Energy, 2003, vol. 28, no. 5. pp. 699-711.
- [9] FARID, MM. STRETTON, R. J. *New Hot Water Cylinder Incorporation Phase Change Heat Storage*. APCChE2002, Christchurch, vol. 29.
- [10] DE GRACIA, A. *Thermal Analysis of Including Phase Change Material in a Domestic Hot Water Cylinder*. Applied Thermal Engineering, 2011, vol. 31, no. 17. pp. 3938-3945.
- [11] NUYTTEN, T. *Comparative Analysis of Latent Thermal Energy Storage Tanks for Micro-CHP Systems*. Applied Thermal Engineering, 2013, vol. 59, no. 1. pp. 542-549.
- [12] WEI, J. *Study on a PCM Heat Storage System for Rapid Heat Supply*. Applied Thermal Engineering, 2005, vol. 25, no. 17. pp. 2903-2920.