

ESTUDIO EXPERIMENTAL SOBRE EL IMPACTO DEL FACTOR DE EMPAQUETAMIENTO EN UN ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA TÉRMICA A ESCALA DE PROTOTIPO CON MATERIALES DE CAMBIO DE FASE EN FORMA TUBULAR

David Verez*, Emiliano Borri*, Zafer Ure, Gabriel Zsembinski*, Luisa F. Cabeza***

* GREiA Research Group, Universitat de Lleida, Pere de Cabrera s/n, 25001-Lleida, Spain, luisaf.cabeza@udl.cat

**Phase Change Material Products Limited, Unit 32, Mere View Industrial Estate, Yaxley, Cambridgeshire, PE7 3HS, United Kingdom, z.ure@pcmproducts.net

RESUMEN/RESUMO

El almacenamiento de energía térmica (TES) es esencial para mejorar la penetración de las energías renovables. Entre todas las tecnologías de almacenamiento, el almacenamiento de energía térmica por calor latente (LTES) con el uso de materiales de cambio de fase ha ganado atención debido a su alta densidad energética. La macro-encapsulación es la técnica más común para incluir PCM en un depósito de almacenamiento. Sin embargo, el diseño del almacenamiento y la distribución del PCM macro-encapsulado tienen un gran impacto sobre la transferencia de calor y la capacidad de almacenamiento de energía. En este estudio se probó experimentalmente un depósito de PCM a escala piloto con una capacidad de almacenamiento de 13 kWh utilizando PCM macro-encapsulado con dos factores de empaquetamiento diferentes.

PALABRAS CLAVE/PALAVRAS-CHAVE: Almacenamiento de energía térmica por calor latente, materiales de cambio de fase (PCM), estudio experimental, macro-encapsulado, forma tubular, factor de empaquetamiento

ABSTRACT

Thermal energy storage (TES) is essential to improve the penetration of renewable energies. Among all storage technologies, latent heat thermal energy storage (LTES) using phase change materials has gained attention due to its high energy density. Macro-encapsulation is the most common technique to include PCM in a storage tank. However, the design of the storage and the distribution of the macro-encapsulated PCM have a great impact on heat transfer and energy storage capacity. In this study, a pilot-scale PCM tank with a storage capacity of 13 kWh was experimentally tested using macro-encapsulated PCM with two different packaging factors.

KEYWORDS: Latent heat thermal energy storage, phase change materials (PCM), experimental study, macro-encapsulation, tube shape, packing factor

INTRODUCCIÓN

El almacenamiento de energía térmica (TES, por sus siglas en inglés) es fundamental para apoyar la penetración de las energías renovables y aumentar la eficiencia de los sistemas energéticos. Utilizando materiales de cambio de fase (PCM, por sus siglas en inglés) como medio de almacenamiento es posible aumentar la densidad energética del sistema de almacenamiento de energía térmica y proporcionar energía térmica a una temperatura casi constante. Estos sistemas basados en el almacenamiento de calor latente han encontrado varias aplicaciones en los sistemas solares, incluyendo las plantas termosolares de concentración (CSP, por sus siglas en inglés) (Prieto et al., 2020) y la refrigeración solar (Palomba et al., 2021) entre otras. El principal reto relacionado con el uso de PCM es mejorar su baja conductividad térmica que influye negativamente en la energía térmica entregada y recibida por el sistema de almacenamiento. Las principales estrategias utilizadas para mejorar la conductividad térmica incluyen el aumento del coeficiente de convección de transferencia de calor mediante sistemas dinámicos, la adición de partículas (como elementos de carbono, partículas metálicas y nanopartículas), la inclusión de PCM en una matriz metálica y el aumento del área de transferencia de calor mediante el uso de aletas y la micro- y macro-encapsulación (Besagni & Croci, 2019; Gasia et al., 2017; Huang et al., 2016; Maldonado et al., 2021). En el almacenamiento de energía térmica, la macro-encapsulación es el principal método utilizado tanto para contener el PCM como para proporcionar la transferencia de calor entre el medio de almacenamiento y el fluido de transferencia de calor utilizado en la aplicación final. El PCM macro-encapsulado puede diseñarse con diferentes geometrías, incluyendo formas rectangulares (Sun et al., 2019), cilíndricas (Xu et al., 2020) y esféricas (Goeke & Schwamborn, 2020). En la literatura, sólo se han publicado unos pocos estudios experimentales sobre el comportamiento de los sistemas de almacenamiento de energía térmica con PCM macro-encapsulado de diferentes formas (D'Avignon & Kummert, 2016; Liu et al., 2011; Moreno et al., 2014). Uno de los principales parámetros que afectan al rendimiento de la transferencia de calor de los sistemas de almacenamiento de energía térmica basados en PCM macro-encapsulado es la distribución y la cantidad de PCM dentro del depósito de almacenamiento (es decir, el factor de empaquetamiento), que afecta tanto a la capacidad total de almacenamiento de energía como a la transferencia de calor (Vérez et al., 2021).

El objetivo de este estudio es evaluar experimentalmente el efecto del factor de empaquetamiento y la distribución del material en un depósito de almacenamiento de energía térmica con PCM macro-encapsulado. El almacenamiento de energía térmica fue diseñado para ser integrado en el prototipo del sistema de calefacción genérico diseñado en el marco del proyecto financiado por la UE SWS-HEATING (GA 764025). En particular, el depósito de PCM se utiliza en el sistema como un buffer térmico para almacenar la energía solar a baja temperatura (15 ± 5 °C) para ser suministrada a un TES estacional basado en materiales sorbentes de agua selectivos. El almacenamiento de energía térmica probado en este estudio, fue diseñado para tener una capacidad de almacenamiento de calor latente de 13 kWh utilizando un PCM comercial (PlusICE17) con una temperatura de cambio de fase de 17 °C encapsulado en tubos de HDPE.

Se realizaron pruebas de carga y descarga con dos factores de empaquetamiento diferentes en un montaje dedicado a medir la distribución de la temperatura en el interior del depósito para evaluar el rendimiento térmico y la capacidad total de almacenamiento de energía del depósito.

METODOLOGÍA

La Figura 1 muestra un esquema simplificado del montaje experimental del grupo de investigación GREiA de la Universidad de Lleida, en España, diseñado para probar el depósito de TES. El montaje es un banco de pruebas utilizado para caracterizar los sistemas TES dentro del rango de temperaturas de -20 °C $< T < 100$ °C que incluye un tanque de agua de inercia de 200 litros refrigerado por una unidad de refrigeración por compresión de vapor de 7 kW y calentado por resistencia eléctrica con una potencia total de 9 kW. El montaje también integra dos bombas de circulación de velocidad variable, utilizadas para controlar el caudal y la temperatura de entrada del fluido caloportador en el sistema TES. Las conexiones entre los componentes se realizaron con tubos de cobre de 1" de diámetro aislados con tubos de poliuretano de 18x0,9 mm. En este caso, se utilizó agua como fluido caloportador (HTF) para cargar y descargar el tanque, cuyo caudal se midió con un caudalímetro Badger tipo ModMAG M1000 con una precisión de $\pm 0,25$ %. El sistema de adquisición de datos utilizado consistió en 3 registradores de datos STEP DL-01 conectados a un ordenador que integra un software de control y adquisición de datos del sistema (SCADA) desarrollado en InduSoft Web Studio. El intervalo de registro de datos se fijó en 1 segundo.

El depósito probado en este estudio y sus dimensiones se muestran en la Figura 2. El material de almacenamiento es una sal hidratada comercial (PlusICE17) proporcionada por la empresa PCM products. Las propiedades termo-físicas según el fabricante se muestran en la Tabla 1. El PCM se encapsula en tubos de polietileno de alta densidad cuyas dimensiones se muestran en la Figura 2. Cada tubo contiene unos 2,5 kg de PCM.

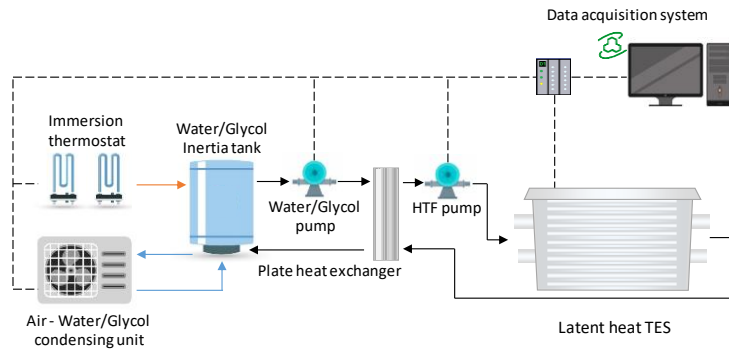


Fig. 1. Vista esquemática del montaje experimental utilizado para realizar la experimentación (Vérez et al., 2021).

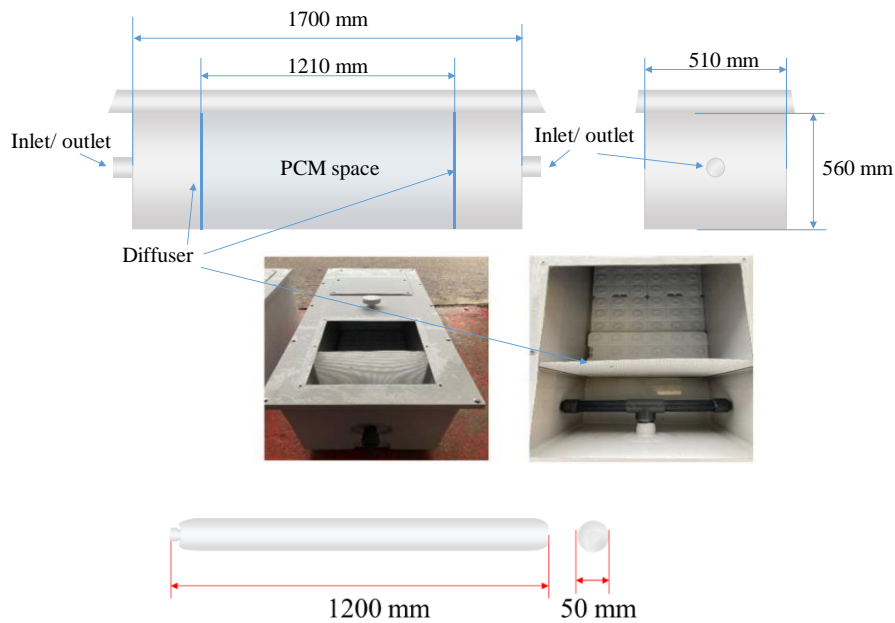


Fig. 2. Dimensiones (en mm) del depósito y de los tubos que contienen el PCM.

Tabla 1. Propiedades termo-físicas del PCM PlusICE S17.

Propiedades	Valor
Temperatura de fusión [°C]	17
Calor latente [kJ/kg]	180
Calor específico [kJ/kg·K]	1,90
Densidad [kg/m ³]	1700-1800
Conductividad térmica [W/m·K]	0,43
Temperatura máxima de operación [°C]	60

El depósito tiene la capacidad de albergar un total de 124 tubos, lo que corresponde a un total de unos 305 kg de PCM para una capacidad de almacenamiento de 13 kWh. Como se ha mencionado anteriormente, el objetivo de este estudio es comparar diferentes factores de empaquetamiento y diferentes distribuciones de los tubos para evaluar el rendimiento térmico. Para reducir el factor de empaquetamiento, mantener una distribución uniforme entre los tubos, y proporcionar espacio para que el fluido calor portador fluya entre los tubos, se diseñó un separador como el que se muestra en la Figura 3a, aumentando así la superficie de transferencia de calor. Para proporcionar un soporte estable entre los tubos, se analizaron las tensiones mecánicas de la pieza diseñada utilizando el programa Autodesk Inventor. Los separadores se fabricaron en PLA (ácido poliláctico) con técnicas de impresión 3D. Utilizando los separadores, el depósito se llenó con 64 tubos (Figura 3b), reduciendo la cantidad total de PCM de 305 kg a 156 kg.

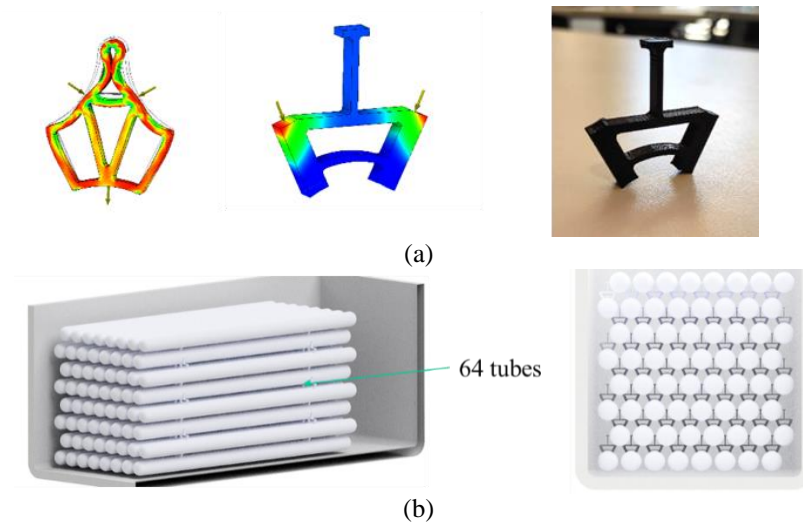


Fig. 3. (a) Separador impreso en 3D y análisis de la tensión mecánica, (b) depósito lleno con tubos distribuidos con los separadores impresos en 3D.

Para caracterizar el comportamiento térmico del depósito, se colocaron un total de 9 sensores (PT-100) dentro del depósito en contacto con los tubos. Los sensores se distribuyeron en tres capas diferentes, en la parte superior, en el centro y en el fondo del depósito, como se muestra en la Figura 4.

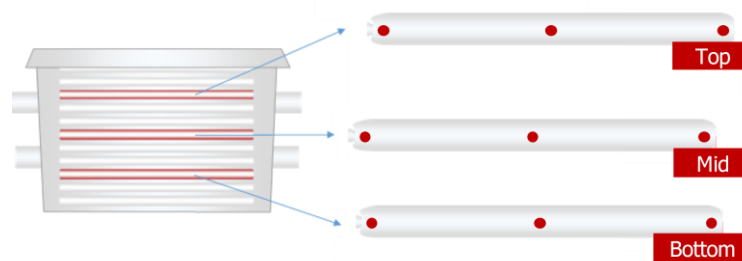


Fig. 4. Disposición de los sensores de temperatura dentro del depósito.

En este estudio, se realizaron pruebas de descarga precalentando el tanque a una temperatura uniforme de 27 ± 1 °C e inyectando agua fría a una temperatura de 7 °C con un caudal másico de 4 l/min. Se evaluó el rendimiento térmico del depósito con las diferentes distribuciones de tubos caracterizando la distribución de la temperatura en el interior del tanque y calculando, mediante un balance energético, la potencia térmica y la energía descargada.

RESULTADOS

Los resultados (Figura 5) muestran que, en ambos casos, tanto con 64 tubos como con 124 tubos, existe una estratificación dentro del depósito, con un mayor énfasis en las pruebas realizadas con 124 tubos. Al analizar el perfil de la potencia térmica entregada por el depósito, con 64 tubos se logra mantener una mayor transferencia de calor en las primeras 5 horas de experimento, para luego caer a valores inferiores a los obtenidos con 124 tubos dentro del depósito. Este resultado confirma la mayor transferencia térmica obtenida al aumentar la superficie de contacto de los tubos al instalar los separadores impresos en 3D (Figura 3). Al analizar la energía entregada en cada caso, el depósito con 64 tubos entregó (en 12 horas de funcionamiento) un total de 12,1 kWh para una densidad energética (considerando 156 kg de PCM y 120 kg de HTF) de 158 kJ/kg, mientras que el depósito con 124 tubos entregó un total de 13,82 kWh para una densidad energética (considerando 305 kg de PCM y 50 kg de HTF) de 140 kJ/kg. Al mejorar la distribución del depósito y completar con HTF el volumen sobrante en la configuración con 64 tubos con PCM (50% menos que en la otra configuración) se logró obtener el 87% de la energía entregada por la configuración con 124 tubos con PCM.

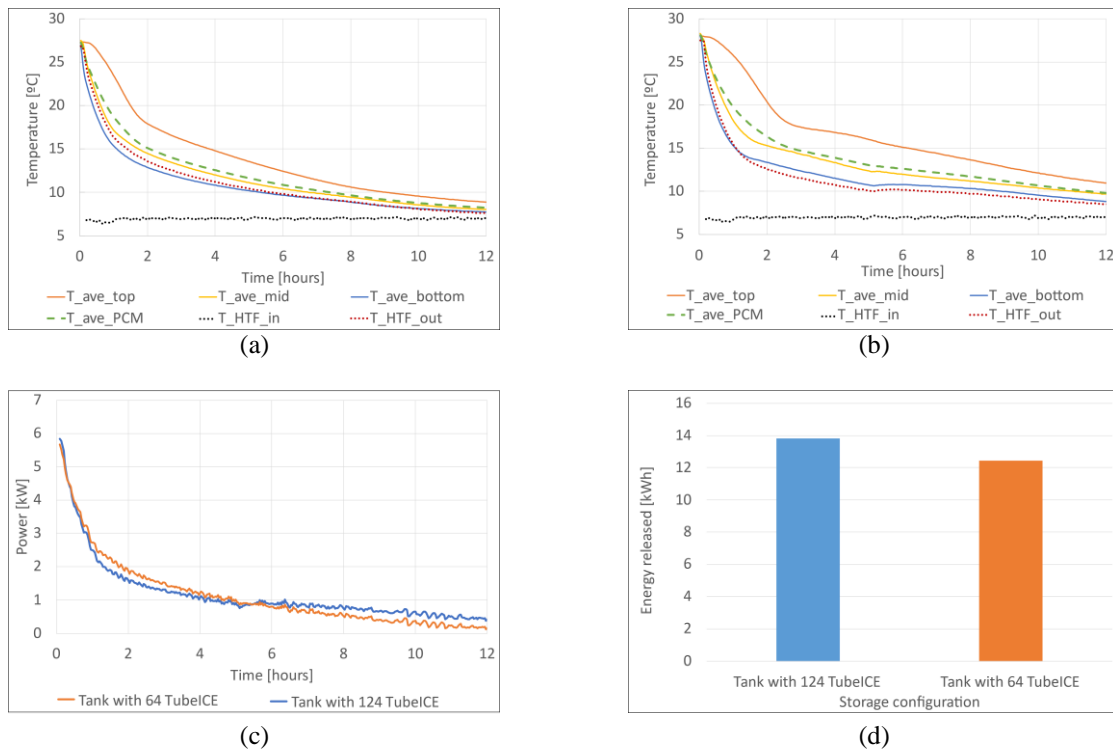


Fig. 5. Resultados de las pruebas experimentales: (a) distribución de temperatura en el depósito con 64 tubos, (b) distribución de temperatura en el depósito con 124 tubos, (c) potencia térmica entregada por el depósito en cada caso, (d) energía térmica entregada por el depósito en cada caso.

CONCLUSIONES

La macro-encapsulación de materiales de cambio de fase (PCM) representa una de las técnicas más utilizadas para la implementación de sistemas de almacenamiento de energía térmica por calor latente. El diseño de la macro-encapsulación y el factor de empaquetamiento son fundamentales para conseguir la mejor combinación entre el rendimiento óptimo de la transferencia de calor y la energía almacenada. En este trabajo se ha analizado, mediante un estudio experimental, el efecto del factor de empaquetamiento en el comportamiento térmico de un depósito de almacenamiento de energía térmica por calor latente durante los procesos de descarga. En este estudio, se fijaron las dimensiones externas del depósito, y se ensayaron dos factores de empaquetamiento (64 tubos y 124 tubos de PCM). El uso de un factor de empaquetamiento menor (51%), pero con una mejor distribución, logró entregar una mayor potencia en las primeras 12 horas de experimento, y aproximadamente el 87% de la energía térmica entregada por la configuración con 124 tubos.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio está parcialmente financiado por la Unión Europea SWS-HEATING (GA 764025), por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades de España (RTI2018-093849-B-C31 - MCIU/AEI/FEDER, UE) y por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades - Agencia Estatal de Investigación (AEI) (RED2018-102431-T). Los autores de la Universidad de Lleida agradecen al Gobierno de Cataluña por la acreditación de calidad concedida al grupo de investigación GREiA (2017 SGR 1537). GREiA es un agente certificado TECNIO en la categoría de desarrolladores tecnológicos del Gobierno de Cataluña. Este trabajo está parcialmente apoyado con ICREA dentro del programa ICREA Academia.

REFERENCIAS

- Besagni G. and Croci L. (2019). Experimental study of a pilot-scale fin-and-tube phase change material storage. *Appl. Therm. Eng.* 160, 114089.
- D'Avignon K. and Kummert M. (2016). Experimental assessment of a phase change material storage tank. *Appl. Therm. Eng.* 99, 880–891.

- Gasia J., Tay N.H.S., Belusko M., Cabeza L.F. and Bruno F. (2017). Experimental investigation of the effect of dynamic melting in a cylindrical shell-and-tube heat exchanger using water as PCM. *Appl. Energy*. 185, 136–145.
- Goeke J. and Schwamborn E. (2020). Phase change material in spherical capsules for hybrid thermal storage. *Chemie-Ingenieur-Technik*. 92, 1098–1108.
- Huang K., Liang D., Feng G., Jiang M., Zhu Y., Liu X. and Jiang B. (2016). Macro-encapsulated PCM cylinder module based on paraffin and float stones. *Materials*. 9, 361.
- Liu M., Saman W. and Bruno F. (2011). Validation of a mathematical model for encapsulated phase change material flat slabs for cooling applications. *Appl. Therm. Eng.* 31, 2340–2347.
- Maldonado J.M., Vérez D., de Gracia A. and Cabeza, L.F. (2021). Comparative study between heat pipe and shell-and-tube thermal energy storage. *Appl. Therm. Eng.* 192, 116974.
- Moreno P., Castell A., Solé C., Zsembinszki G. and Cabeza, L.F. (2014). PCM thermal energy storage tanks in heat pump system for space cooling. *Energy Build.* 82, 399–405.
- Palomba V., Bonanno A., Brunaccini G., Aloisio D., Sergi F., Dino G.E., Varvaggiannis E., Karellas S., Nitsch B., Strehlow A., Große A., Herrmann R., Barmparitsas N., Koch N., Vérez D., Cabeza L.F., Zsembinszki G. and Frazzica A. (2021). Hybrid Cascade Heat Pump and Thermal-Electric Energy Storage System for Residential Buildings: Experimental Testing and Performance Analysis. *Energies*. 14, 2580.
- Prieto C., Fereres S. and Cabeza L.F. (2020). The Role of Innovation in Industry Product Deployment: Developing Thermal Energy Storage for Concentrated Solar Power. *Energies*. 13, 2943.
- Sun X., Chu Y., Medina M.A., Mo Y., Fan S. and Liao S. (2019). Experimental investigations on the thermal behaviour of phase change material (PCM) in ventilated slabs. *Appl. Therm. Eng.* 148, 1359–1369.
- Vérez D., Borri E., Crespo A., Mselle B.D., de Gracia Á., Zsembinszki G. and Cabeza L.F. (2021). Experimental Study on Two PCM Macro-Encapsulation Designs in a Thermal Energy Storage Tank. *Appl. Sci.* 11, 6171.
- Xu T., Humire E.N., Chiu J.N.-W. and Sawalha S. (2020). Numerical thermal performance investigation of a latent heat storage prototype toward effective use in residential heating systems. *Appl. Energy*. 278, 115631.