

SISTEMA MÓVIL DE ALMACENAMIENTO TÉRMICO EN FRÍO CON MATERIALES DE CAMBIO DE FASE (PCM) PARA APLICACIONES DE REFRIGERACIÓN Y APOYO A LA INTEGRACIÓN DE ENERGÍA SOLAR

Valido F.S.*, Navarro P.R.*

* Departamento de Energías Renovables, Instituto Tecnológico de Canarias, Playa de Pozo Izquierdo s/n, 35119-Santa Lucía, (Las Palmas), España, fvsantana@itccanarias.org

RESUMEN

Este trabajo presenta el desarrollo experimental de un sistema móvil de almacenamiento de energía térmica (TES) en frío basado en materiales de cambio de fase (PCM) instalado en el Instituto Tecnológico de Canarias (ITC). La instalación se implementa en un contenedor de 20 pies que integra una cámara frigorífica con consigna positiva, una sala de máquinas equipada con una central frigorífica y un depósito activo de almacenamiento térmico de 400 L con PCM encapsulado. El sistema frigorífico está compuesto por un circuito primario con refrigerante R-449A y un circuito secundario con fluido caloportador, instrumentado con sensores de temperatura y caudal para la adquisición continua de datos y el análisis energético del sistema. La campaña experimental se ha desarrollado siguiendo el Método 1 de la norma ANSI/ASHRAE 150-2025, orientado a la caracterización del rendimiento del almacenamiento térmico mediante ensayos controlados de carga y descarga. Los resultados obtenidos muestran una energía de carga del almacenamiento de aproximadamente 8,17 kWh en el rango de operación comprendido entre -3 °C y -18 °C, mientras que la descarga útil medida en el mismo intervalo alcanza valores cercanos a 7,96 kWh. Durante el ensayo de descarga se observa una potencia térmica suministrada por el almacenamiento comprendido entre 0,5 kW y 0,8 kW, suficiente para cubrir la carga base de la cámara frigorífica. Los resultados evidencian la capacidad del sistema para desplazar la producción de frío hacia periodos de mayor disponibilidad energética. En particular, el almacenamiento puede cargarse en ventanas de aproximadamente cuatro horas y suministrar energía térmica durante periodos cercanos a 20 horas bajo condiciones reales de operación, lo que pone de manifiesto el potencial del TES con PCM como herramienta de flexibilidad para facilitar la integración de energía solar en aplicaciones de refrigeración.

PALABRAS CLAVE: Almacenamiento Térmico, TES, PCM, Refrigeración, Energía Solar.

ABSTRACT

This work presents the experimental development of a mobile cold thermal energy storage (TES) system based on phase change materials (PCM), installed at the Canary Islands Institute of Technology (ITC). The installation is implemented in a 20-foot container that integrates a cold room with a positive set point and a machine room equipped with a refrigeration unit and an active 400 L thermal storage tank containing encapsulated PCM. The refrigeration system consists of a primary circuit using refrigerant R-449A and a secondary circuit with temperature and flow sensors for continuous data acquisition and energy performance analysis. The experimental campaign was conducted following Method 1 of the ANSI/ASHRAE 150-2025 standard, aimed at characterizing the performance of the thermal storage system through controlled charge and discharge tests. The results obtained show a charging energy of approximately 8.17 kWh within the operating range between -3 °C and -18 °C, while the useful discharge measured in the same range reaches values close to 7.96 kWh. During the discharge test, the thermal power delivered by the storage system ranged between 0.5 kW and 0.8 kW, which is sufficient to cover the cold room's base load over extended periods. The results demonstrate the capability of the system to shift cooling production to periods of higher energy availability. In particular, the storage can be charged within approximately four hours and deliver cooling energy for periods close to 20 hours under real operating conditions, highlighting the potential of PCM-based TES as a flexibility solution to support the integration of solar energy in refrigeration applications.

KEYWORDS: Thermal Energy Storage (TES), PCM, Cooling, Solar Energy.

INTRODUCCIÓN

Contexto y Relevancia del Estudio

La refrigeración constituye una infraestructura esencial y transversal para múltiples actividades productivas con un impacto significativo en términos energéticos, económicos y ambientales. El incremento de las temperaturas ambientales y a la electrificación progresiva de los sistemas y la revisión del Reglamento sobre gases fluorados de efecto invernadero (*F-Gas, 2024*) exigen soluciones que mejoren la eficiencia y promuevan la transición hacia tecnologías que minimicen las emisiones de gases de efecto invernadero.

Almacenamiento Térmico como Estrategia de Flexibilidad

El almacenamiento de energía térmica (TES, *Thermal Energy Storage*) mediante materiales de cambio de fase (PCM, *Phase Change Materials*) permite desplazar consumos eléctricos de los sistemas frigoríficos. La energía puede almacenarse durante periodos de alta disponibilidad renovable y liberarse posteriormente cuando la demanda lo requiere. Esto contribuye a mejorar la eficiencia global del sistema, optimizar la operación de los equipos, incrementar la flexibilidad de la demanda, reducir picos de consumo eléctrico y evitar el sobredimensionamiento de los equipos de producción de frío.

Estado del Arte y Limitaciones Actuales

Existen numerosos estudios que analizan el comportamiento de los PCM en aplicaciones de refrigeración, destacando su capacidad para suavizar las cargas térmicas y aumentar la estabilidad de los regímenes de operación. Sin embargo, la mayor parte de las investigaciones se desarrollan en condiciones de laboratorio o mediante simulaciones numéricas, persistiendo una limitada disponibilidad de datos experimentales en configuraciones a escala real. La norma *ANSI/ASHRAE Standard 150-2025 (ASHRAE, 2025)* define procedimientos detallados para la caracterización y verificación del rendimiento de sistemas de almacenamiento térmico en frío.

Antecedentes y Desarrollo Previo en el ITC

El Instituto Tecnológico de Canarias (ITC) ha desarrollado estudios orientados a evaluar la integración de generación eléctrica renovable en sistemas de climatización y refrigeración apoyados mediante almacenamiento térmico. En este contexto, se ha desarrollado una instalación modular móvil de generación de frío y almacenamiento térmico con PCM, implementada en un contenedor que integra una cámara frigorífica y una sala de máquinas con un depósito TES que incorpora materiales de cambio de fase encapsulados en su interior. La instalación está diseñada para operar con una estrategia de gestión energética que prioriza la carga del almacenamiento térmico durante las horas de mayor disponibilidad de generación fotovoltaica y su descarga para sostener el servicio frigorífico en periodos sin radiación o ante incrementos puntuales de la demanda. Tras una fase inicial de desarrollo, se realizaron diversas actuaciones previas incluyendo mejoras hidráulicas, sustitución del fluido caloportador y del caudalímetro, reparación del circuito frigorífico y ajustes en la estrategia de control, con el objetivo de mejorar la estabilidad operativa y garantizar la fiabilidad de los ensayos. Estas intervenciones permitieron establecer un estado de referencia fiable para la realización de los ensayos.

Objetivo y Contribución del Trabajo

El objetivo principal de este estudio es analizar el comportamiento térmico y energético de un sistema móvil de almacenamiento en frío con PCM integrado en un circuito de refrigeración real, evaluando su influencia sobre la demanda eléctrica y su potencial para mejorar la gestión de la energía en instalaciones convencionales. El trabajo combina la caracterización experimental del módulo TES con el cálculo de indicadores de rendimiento energético y de capacidad de desplazamiento de carga, estableciendo una base metodológica para futuras estrategias de control y optimización en sistemas de refrigeración avanzada. El reto técnico no es únicamente operar la planta sino cuantificar su comportamiento y documentarlo de forma que los resultados sean fiables, comparables y reproducibles, asegurando una trazabilidad completa desde la instrumentación y la adquisición de datos hasta los indicadores finales de rendimiento. Dado que se trata de un sistema real, el análisis contempla también la influencia de mantenimientos correctivos, pequeñas incidencias operativas y ajustes de consigna y control realizados durante la puesta a punto, dejando constancia de su alcance e impacto cuando procede.

DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SISTEMA

Caracterización de la Instalación y Parámetros Principales

La investigación se desarrolla en una instalación experimental móvil implementada en un contenedor no estándar de 20 pies tipo *High Cube*, diseñada para evaluar el comportamiento térmico de sistemas de almacenamiento en frío mediante materiales PCM. Como se muestra en la Figura 1, la planta reproduce un sistema de refrigeración indirecto con circuito secundario y almacenamiento térmico integrado, permitiendo analizar el funcionamiento de la planta experimental bajo ciclos controlados de carga y descarga del almacenamiento.



Fig. 1. Sistema móvil con cámara frigorífica y sala de máquinas con almacenamiento

El contenedor se organiza en dos compartimentos funcionales: una cámara frigorífica y una sala de máquinas donde se ubican los subsistemas de producción, distribución y almacenamiento de frío. La cámara frigorífica dispone de un volumen útil de 14 m³ y está diseñada para operar con consignas de conservación de +8°C y -18 °C. En los ensayos realizados en este trabajo se ha utilizado una consigna tal que garantice una temperatura interior del producto de +5°C, representativa de aplicaciones de refrigeración comercial. El enfriamiento del recinto se realiza mediante el circuito secundario a través de un enfriador de aire cúbico industrial de tubos de cobre y aletas de aluminio con dos ventiladores axiales.

La producción frigorífica se realiza mediante una central equipada con compresor alternativo semi-hermético y refrigerante R-449A en el circuito primario. El intercambio térmico entre el circuito primario y el secundario se realiza mediante un intercambiador de placas soldadas. El circuito secundario utiliza como fluido caloportador una solución TEMPER-40 impulsada por una bomba de caudal variable, mientras que la distribución del flujo se gestiona mediante válvulas motorizadas de tres vías que permiten controlar los modos de operación del sistema y gestionar los ciclos de carga y descarga del almacenamiento.

La instalación incorpora un sistema de control y adquisición de datos basado en un controlador programable y supervisión SCADA que permite registrar en continuo las principales variables térmicas, hidráulicas y eléctricas necesarias para el análisis energético de la instalación.

Almacenamiento de Energía Térmica

La configuración de la instalación corresponde a un esquema de intercambio por inmersión directa, en el que el fluido caloportador circula a través del depósito estableciendo el intercambio térmico con las cápsulas de PCM. Este diseño permite aprovechar tanto el almacenamiento latente asociado al cambio de fase del material como la capacidad sensible del fluido contenido en el depósito.

El almacenamiento se realiza mediante un depósito con un volumen nominal de 400 L cargado con fluido secundario Temper-40, en cuyo interior se disponen 350 unidades encapsuladas de PCM del tipo *HeatSel* ATS-10 del fabricante Axiotherm GmbH. Según la capacidad específica indicada por el fabricante, 345 kJ/kg en el intervalo comprendido entre -18 °C y -3 °C, y considerando una masa total de PCM encapsulado de 142,5 kg, la capacidad teórica de almacenamiento asociada al PCM resulta de aproximadamente 13,7 kWh. Considerando la contribución del almacenamiento sensible del fluido secundario contenido en el depósito, la capacidad teórica global del sistema puede situarse en torno a 16,9 kWh.

Las principales características geométricas y termodinámicas del sistema de almacenamiento térmico se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros principales del sistema de almacenamiento térmico en PCM

Parámetro	Valor
Volumen nominal del depósito	400 L
Nivel de llenado	97%
Volumen ocupado por el almacenamiento	388 L
Número de cápsulas PCM	350 unidades
Temperatura de fusión	-11 °C a -8 °C
Temperatura de solidificación	-11 °C a -13 °C
Rango operativo del PCM	-18 °C a -3 °C
Capacidad de almacenamiento PCM en rango	345 kJ/kg
Masa total de PCM encapsulado	142,5 kg
Volumen de PCM encapsulado	174,6 L
Volumen de fluido caloportador	213,4 L
Fluido caloportador	Temper-40
Densidad del fluido caloportador a -10°C	1218 kg/m ³
Calor específico del fluido caloportador a -10°C	2,951 kJ/(kg·K)

Condiciones de Operación

El sistema está diseñado para operar en rangos de temperatura compatibles con aplicaciones de conservación alimentaria y farmacéutica, permitiendo mantener dentro de la cámara frigorífica condiciones habituales de almacenamiento tanto para productos alimenticios como para medicamentos termolábiles. La cámara frigorífica opera con una temperatura de consigna de +2 °C y una banda de histéresis de ± 3 °C, lo que permite estabilizar una temperatura aproximada de +5 °C en el interior del producto mediante una sonda de simulación térmica.

En relación con el almacenamiento de energía térmica, el sistema opera tomando como referencia una temperatura del fluido caloportador secundario de -18 °C, valor compatible con el rango operativo del PCM ATS-10 y suficientemente alejado de su zona de cambio de fase como para asegurar una condición de carga adecuada del almacenamiento. Este criterio permite disponer de un estado térmico de partida bien definido y coherente con el modo de funcionamiento previsto para el sistema.

La Tabla 2 resume los principales parámetros de operación y control del sistema, incluyendo los valores de referencia de la cámara frigorífica, del almacenamiento y de los circuitos primario y secundario.

Tabla 2. Parámetros de operación y control del sistema TES

Parámetro	Valor
<i>Set-point</i> cámara frigorífica	+2 °C
Banda de histéresis de control	± 3 °C
Temperatura interior del producto objetivo	+5 °C
Rango de operación del sistema TES	-3 °C a -18 °C
Refrigerante	R-449A
Presión de evaporación	0,8 – 1,5 bar
Fluido secundario	Temper-40

En consecuencia, los parámetros adoptados configuran las condiciones de operación del sistema TES y establecen la base para analizar su comportamiento energético y térmico.

Esquema Simplificado del Circuito de Carga y Descarga

La Figura 2 muestra el esquema simplificado del sistema de almacenamiento térmico para satisfacer la carga de refrigeración. Este diagrama permite identificar la arquitectura general de la instalación, así como los principales subsistemas y puntos de intercambio térmico entre el circuito primario, el circuito secundario, el dispositivo de almacenamiento y los lugares de medición del caudal de fluido y de la temperatura.

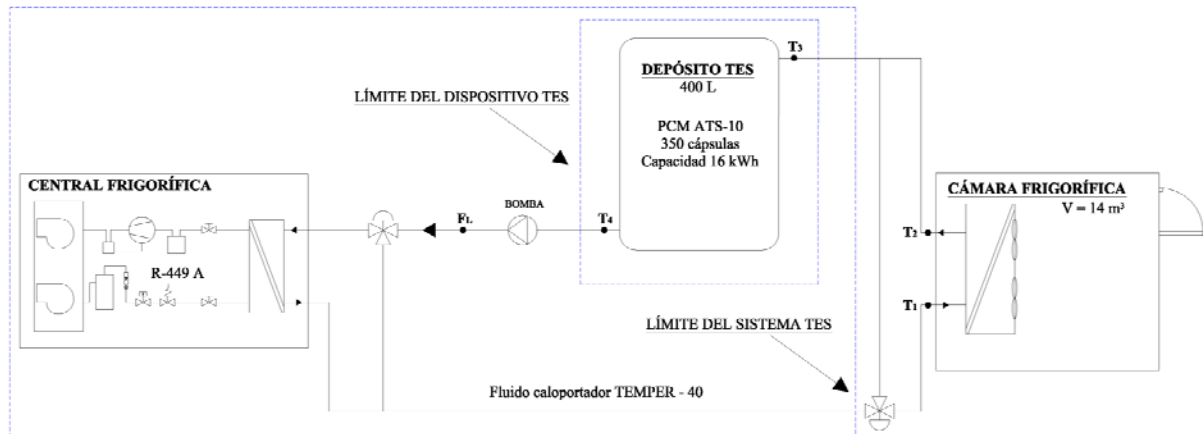


Fig. 2. Esquema simplificado del sistema frigorífico y del circuito de almacenamiento térmico con PCM

El sistema se basa en una configuración de refrigeración indirecta compuesta por un circuito primario con refrigerante R-449A y un circuito secundario que utiliza como fluido caloportador una solución Temper-40. Ambos circuitos se acoplan térmicamente mediante un intercambiador de placas soldadas que permite transferir la potencia frigorífica generada en la central hacia el circuito de distribución.

En el circuito secundario, el fluido caloportador transporta la energía térmica hacia dos subsistemas principales. Por un lado, alimenta el enfriador de aire situado en el interior de la cámara frigorífica, responsable de mantener las condiciones de temperatura establecidas durante los ensayos. Por otro lado, permite realizar los procesos de carga y descarga del depósito de almacenamiento térmico, donde se acumula energía frigorífica mediante el cambio de fase del PCM encapsulado.

Durante el modo de carga, la central frigorífica reduce la temperatura del fluido secundario y solidifica el PCM contenido en el depósito TES. En el modo de descarga, el fluido circula a través del depósito absorbiendo el frío almacenado y suministrándolo posteriormente a la cámara frigorífica, permitiendo cubrir la demanda térmica sin necesidad de activar la producción frigorífica.

Plan de Instrumentación y Adquisición de Datos

La instalación dispone de la instrumentación requerida para la caracterización de dispositivos de almacenamiento térmico que utilizan el mismo fluido en los procesos de carga y descarga (configuración de fusión interna). En esta configuración el fluido caloportador circula entre la central frigorífica, el depósito de almacenamiento térmico y la carga representada por la cámara frigorífica, permitiendo determinar la potencia térmica transferida mediante el balance energético del fluido.

La instrumentación requerida comprende la medición del caudal del fluido caloportador F_L que circula a través del depósito de almacenamiento, del evaporador de la central frigorífica y del enfriador de aire situado en la cámara frigorífica, así como las temperaturas características del circuito secundario: T_1 , correspondiente a la temperatura del fluido que sale del sistema TES; T_2 , temperatura del fluido que regresa al sistema TES; T_3 , temperatura del fluido que entra en el depósito TES; y T_4 , temperatura del fluido que sale del depósito TES.

El sistema de adquisición de datos registra estas variables de forma continua durante los ciclos completos de carga y descarga del almacenamiento. En la presente instalación se adopta una frecuencia de muestreo de un minuto, lo que excede los requisitos del Método 1 de la norma y proporciona una resolución temporal adecuada para el análisis energético de la planta experimental y la integración de la energía térmica transferida durante los ensayos.

METODOLOGÍA DE ENSAYO

Ensayo de Sistemas de Almacenamiento Latente

La caracterización experimental del almacenamiento térmico se realiza siguiendo el Método 1 de la norma ANSI/ASHRAE 150-2025, aplicable a dispositivos de almacenamiento que utilizan el mismo fluido caloportador durante los procesos de carga y descarga. De acuerdo con esta norma, el ensayo completo de caracterización se

compone de dos fases consecutivas: un ensayo de ciclo de carga inicial del dispositivo de almacenamiento y un ensayo de ciclo de descarga, cuyo objetivo es determinar la capacidad de almacenamiento térmico utilizable.

Antes de iniciar los ensayos, se realizan ciclos preliminares de operación para comprobar el correcto funcionamiento de los equipos, verificar el caudal máximo de diseño de la bomba y confirmar la estabilidad de las condiciones operativas del circuito hidráulico.

Durante el ensayo se registran de forma continua las variables definidas del caudal del fluido caloportador (F_L) y las temperaturas características del circuito secundario (T_1 , T_2 , T_3 y T_4). Estas variables permiten determinar el calor total extraído o suministrado por el dispositivo de almacenamiento mediante el balance energético del fluido.

Debe señalarse que tanto durante la prueba de carga como durante la prueba de descarga se mantiene simultáneamente la demanda de la cámara frigorífica. De este modo, la planta experimental opera bajo condiciones reales de servicio y no en vacío, garantizando que una fracción de la potencia frigorífica producida o liberada se destina en todo momento a cubrir la carga térmica del recinto refrigerado. En este contexto, el fluido secundario circula hacia el enfriador de aire de la cámara a través de una válvula modulante de tres vías, cuya apertura se ajusta en función de la lectura de la sonda ubicada en el retorno al Sistema TES (T_2). De este modo, se evitan descensos excesivos de temperatura en el interior de la cámara cuando el fluido circula a temperaturas muy bajas, modulando el aporte de frío y manteniendo una operación estable, segura y representativa del uso real.

Procedimiento de la Prueba de Carga

El ensayo de ciclo de carga inicial permite determinar el tiempo necesario para que el sistema alcance el estado de carga completa del almacenamiento.

El procedimiento comienza con el depósito TES en estado completamente descargado y en condiciones de estado estacionario. De acuerdo con la norma, esta condición se considera alcanzada cuando las temperaturas del fluido a la entrada y la salida del almacenamiento (T_3 y T_4) se mantienen aproximadamente 7°C por encima de la temperatura de cambio de fase del PCM durante al menos 15 minutos.

Una vez establecida la condición inicial, se inicia el proceso de carga mediante la puesta en funcionamiento de la central frigorífica y la circulación del fluido caloportador a través del depósito TES con el caudal de diseño suficiente para garantizar el funcionamiento de la central frigorífica. Durante esta fase, la central debe reducir progresivamente la temperatura del fluido secundario produciendo la solidificación del material de cambio de fase contenido en el depósito.

El ciclo de carga finaliza al término de una ventana operativa fija de 4 horas, definida para representar la disponibilidad solar y asegurar la repetitividad del ensayo. Con esta condición se registra la evolución térmica del TES como verificación de solidificación del PCM dentro del rango operativo.

Para facilitar el análisis posterior, los datos experimentales se clasifican en las siguientes etapas operativas:

- Estado estacionario inicial, correspondiente al periodo previo al arranque de la central frigorífica, con el almacenamiento completamente descargado.
- Periodo transitorio, asociado a la puesta en marcha de la central frigorífica y a la estabilización de caudal y de las temperaturas.
- Inicio del ciclo de carga, en el que se establece el régimen de operación y comienza el proceso efectivo de solidificación del PCM.
- Condición operativa de finalización de carga, alcanzada cuando el sistema mantiene la temperatura del fluido caloportador secundario en torno a -18°C durante al menos 15 minutos.

Procedimiento de la Prueba de Descarga

El ensayo del ciclo de descarga tiene como objetivo determinar la cantidad útil real del almacenamiento térmico y caracterizar la entrega de frío del sistema TES bajo condiciones de operación representativas, verificando el rango de temperaturas en el que el almacenamiento es capaz de cubrir la demanda de la cámara frigorífica.

La prueba de descarga comienza con el depósito en condición de carga completa, alcanzada al finalizar el ciclo de carga inicial conforme al criterio operativo definido. Antes del inicio del ensayo se configuran las válvulas de la planta experimental para dirigir completamente el flujo del fluido caloportador a través del depósito de almacenamiento, de modo que la circulación del circuito secundario no atraviese el intercambiador de la central frigorífica durante la descarga. Asimismo, se fija el caudal de operación al valor establecido para el ensayo, garantizando el suministro hacia la cámara frigorífica siempre que ésta entre en demanda.

Durante el ciclo de descarga se identifican los principales hitos de evaluación asociados al Método 1 de la norma: (i) la carga máxima equivalente: determinada como el valor máximo de la potencia de descarga promediada en intervalos de 15 minutos; y (ii) la potencia correspondiente a un estado de descarga equivalente seleccionado, definido en este trabajo como el 80% de la descarga acumulada total. A partir de este último se obtiene la carga crítica adoptada, calculada como el promedio de 15 minutos correspondiente a dicho nivel. Esta definición permite localizar un punto representativo de descarga avanzada y facilita la comparación entre ciclos bajo un mismo criterio.

El ensayo de descarga se considera finalizado cuando la temperatura del fluido a la salida del almacenamiento (T_4) supera la temperatura máxima utilizable del sistema durante un periodo mínimo de 15 minutos continuos, condición que indica el agotamiento de la capacidad útil del almacenamiento térmico.

Cálculo de las Pruebas de Carga y Descarga

La determinación de la capacidad térmica del almacenamiento se realiza a partir del balance energético del fluido caloportador, utilizando las variables medidas durante los ensayos: caudal volumétrico del fluido secundario y temperaturas de entrada y salida del módulo TES. Una vez recopilados los datos experimentales de los ciclos de carga y descarga, se verifica previamente que las variables registradas se encuentran dentro de los rangos de operación definidos en las condiciones de ensayo, asegurando la coherencia de los datos y la estabilidad del régimen de funcionamiento durante el periodo analizado.

La potencia térmica transferida en cada intervalo de registro se determina conforme a ANSI/ASHRAE 150-2025 mediante:

$$q_i = V_i \rho c_p (T_{4,i} - T_{3,i}) F_1 \quad (1)$$

Donde q_i es la potencia frigorífica en kW , V_i es el caudal promedio en L/s , ρ la densidad del fluido secundario en kg/m^3 , c_p el calor específico del fluido secundario en $kJ/(kg \cdot K)$, F_1 es el factor de conversión al Sistema Internacional ($F_1 = 0,001$), $T_{4,i}$ temperatura del fluido a la salida del depósito en $^{\circ}C$, $T_{3,i}$ temperatura del fluido a la entrada del depósito en $^{\circ}C$. Con esta conversión, q_i adopta signo positivo durante la carga y signo negativo durante la descarga (entrega de frío), lo que facilita la representación conjunta de ambos procesos en los resultados.

La energía total integrada durante el periodo considerado se obtiene por la siguiente ecuación:

$$Q_{total} = \sum_{i=1}^n q_i \times \frac{t_i}{60 \text{ min/hr}} \quad (2)$$

Donde Q_{total} es la refrigeración total integrada durante el periodo considerado, expresada en kWh , n el número total de intervalos, q_i la potencia térmica en el intervalo i , expresada en kW ; y t_i es la duración del incremento en minutos. Cuando se requiere expresar la energía descargada como magnitud positiva se emplea el valor absoluto de la contribución de descarga.

Tratamiento y Procesamiento de los Datos experimentales

El registro de datos se realiza con una frecuencia de un minuto, lo que permite obtener una resolución temporal superior a la requerida por el Método 1 de la norma. A partir de estos registros se calcularon las variables energéticas mediante un procedimiento de balance energético e integración temporal implementado en una hoja de cálculo.

Previamente a la integración, se aplican verificaciones de coherencia para asegurar la calidad del conjunto de datos mediante la comprobación de rangos de operación, detección de discontinuidades e identificación de valores atípicos asociados a variaciones puntuales de caudal o a transitorios derivados de la demanda y del control.

Para garantizar comparabilidad entre los ensayos, se adopta una convención de signo (carga positiva y descarga negativa) y, cuando procede, se emplean promedios en ventanas de 15 minutos para evaluar condiciones sostenidas. Finalmente, la potencia térmica se integra en el tiempo para obtener la energía acumulada durante cada ciclo, estimando de forma consistente la energía almacenada en carga y la energía liberada en descarga, base para la evaluación del rendimiento del almacenamiento térmico.

RESULTADOS EXPERIMENTALES

El ensayo cubrió el rango de operación del módulo TES entre $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$, registrando de forma continua las temperaturas de entrada y salida del depósito (T_3 y T_4), el caudal del fluido secundario y la potencia térmica calculada. La Figura 3 muestra la evolución temporal de estas variables a lo largo de los ciclos de carga y descarga.

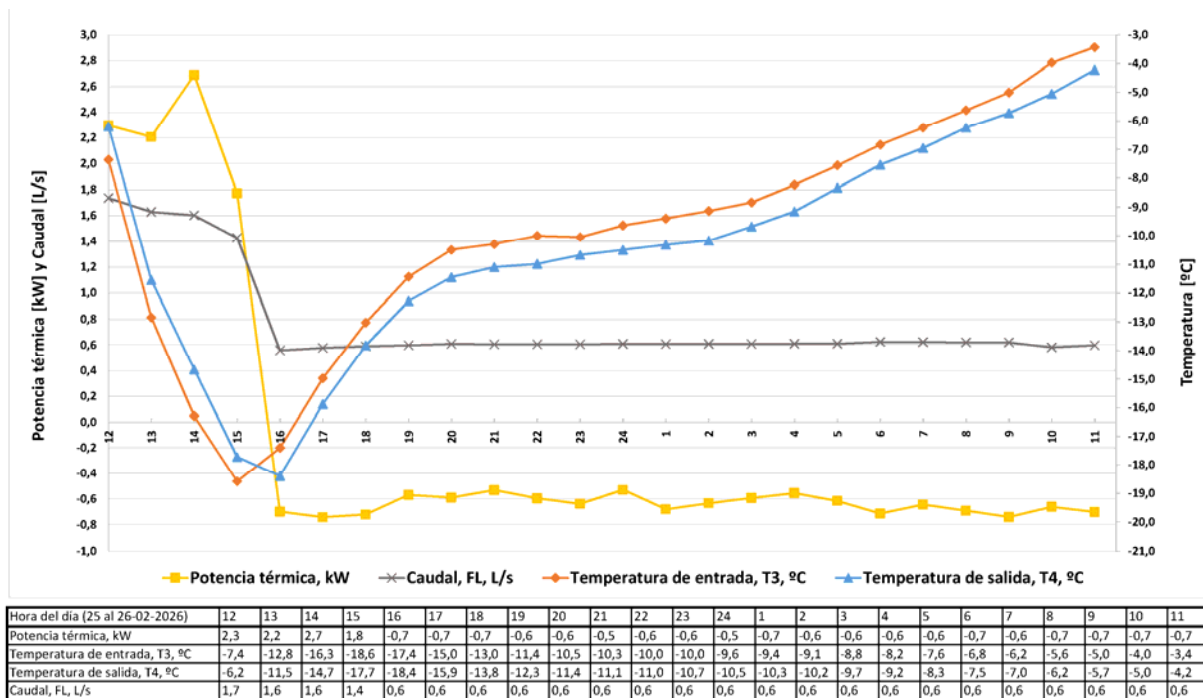


Fig. 3. Evolución temporal de las variables de operación del módulo TES durante el ensayo: potencia térmica, caudal de fluido secundario y las temperaturas de entrada (T_3) y salida (T_4) del depósito.

El ensayo desarrollado en una ventana de 24 horas se resume en la Tabla 3, donde se registra una energía en el ciclo de carga de 8,17 kWh y una energía en el ciclo de descarga de 7,96 kWh, lo que corresponde a una eficiencia global del ciclo de 0,97.

Tabla 3. Resultados energéticos del ciclo de carga y descarga

Parámetro	Valor
Método de referencia	ANSI/ASHRAE 150-2025 Método 1
Energía durante la carga	8,17 kWh
Energía descargada	7,96 kWh
Eficiencia del ciclo	0,97

La Figura 4 muestra la evolución horaria de la temperatura del producto, de la temperatura ambiente en el interior de la cámara y de la temperatura de control.

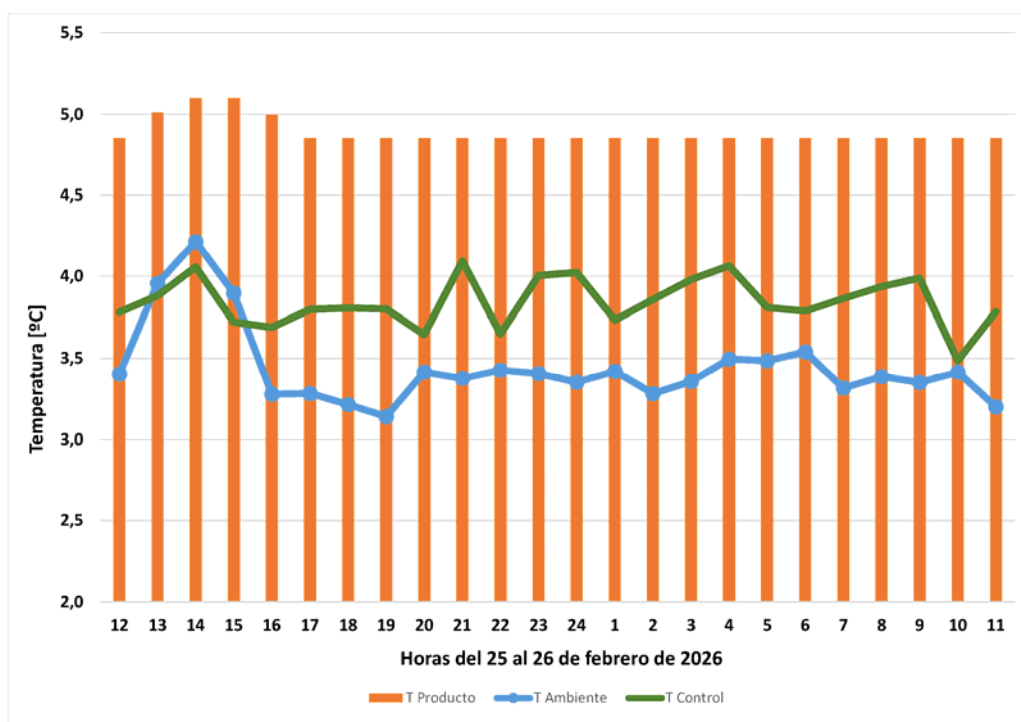


Fig. 4. Evolución horaria de la temperatura del producto, de la temperatura ambiente en el interior de la cámara y de la temperatura de control.

En conjunto, los resultados del ensayo permiten caracterizar el comportamiento del sistema TES con PCM conforme al Método 1, identificar la secuencia temporal de los hitos operativos del sistema y cuantificar la energía intercambiada en la prueba de carga y descarga.

CONCLUSIONES

El desarrollo del módulo móvil de almacenamiento térmico en frío con PCM en el Instituto Tecnológico de Canarias ha permitido disponer de una infraestructura experimental flexible para la evaluación de sistemas TES aplicados a la refrigeración en condiciones reales de operación, manteniendo simultáneamente la demanda de la cámara frigorífica durante los ciclos de carga y descarga.

Los ensayos se realizaron sobre un depósito TES de 400 L con 350 encapsulados de PCM ATS-10, cuya capacidad de diseño se sitúa en torno a 16,9 kWh, de los cuales 13,7 kWh corresponden al almacenamiento asociado al PCM y el resto a la contribución sensible del fluido secundario. Tomando como referencia el Método 1 de ANSI/ASHRAE 150-2025, y a partir de la instrumentación de caudal y temperaturas del circuito secundario, ha sido posible caracterizar el comportamiento energético del almacenamiento y comprobar la coherencia del balance térmico.

En el ensayo representativo de 24 horas, el sistema integró 8,17 kWh durante la carga y recuperó 7,96 kWh durante la descarga, obteniéndose una eficiencia de ciclo de 0,97, lo que indica un balance energético coherente y una operación estable. La energía efectivamente movilizada representa aproximadamente el 47% de la capacidad teórica total estimada a partir de las características del material PCM definidas por el fabricante. Ello sugiere que bajo las condiciones reales de operación impuestas (ventana de carga, consignas, caudal y demanda simultánea de la cámara), el almacenamiento térmico en PCM encapsulado aprovecha solo una parte del potencial teórico disponible dentro del rango térmico considerado.

Durante la descarga se observó la capacidad del sistema para mantener una potencia frigorífica sostenida del orden de la carga base de la cámara, alcanzando una descarga máxima de 0,8 kW. Este comportamiento permitió prolongar el suministro de frío desde el almacenamiento y mantener la temperatura en el interior de la cámara sin requerir la operación continua de la central frigorífica.

Desde el punto de vista operativo, el sistema demuestra capacidad para adaptar el nivel de energía almacenada a la duración de la ventana de carga disponible, un aspecto especialmente relevante en configuraciones con generación renovable variable, donde la energía útil se concentra en franjas horarias limitadas. En conjunto, el estudio confirma la viabilidad técnica del almacenamiento térmico en PCM como solución para apoyar la integración de energía solar en aplicaciones de refrigeración: El sistema TES desacopla parcialmente la producción de frío de la demanda instantánea, desplaza consumo eléctrico hacia periodos de mayor disponibilidad fotovoltaica y reduce la dependencia de la producción frigorífica en tiempo real. En este marco, el almacenamiento actúa como un elemento de flexibilidad energética y operativa que facilita estrategias de gestión más eficientes en instalaciones frigoríficas.

Como líneas futuras, se prevé ampliar la campaña experimental con un mayor número de ciclos y condiciones de contorno (consignas, caudales, perfiles de demanda y estados de carga), incorporar métricas de incertidumbre y repetitividad, y aplicar métodos más completos de la norma para evaluar perfiles equivalentes, criterios de carga crítica y desempeño del TES en escenarios representativos de integración con generación fotovoltaica y estrategias de control.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se desarrolla en el marco del proyecto **RESMAC (1/MAC/2/2.2/0011) – Innovative and Strategic Renewable Energy Sources to drive the transition to climate neutrality in Macaronesia**, cofinanciado por la Comisión Europea a través del Programa de Cooperación Territorial INTERREG VI -D Madeira-Azores-Canarias (MAC 2021-2027). Asimismo, se reconoce la colaboración del Instituto Tecnológico de Canarias (ITC) y de los socios del consorcio RESMAC.

REFERENCIAS

American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers. (2025). *ANSI/ASHRAE Standard 150-2025: Method of testing the performance of cool storage systems*. ASHRAE.

European Parliament and Council of the European Union. (2024). *Regulation (EU) 2024/573 on fluorinated greenhouse gases, amending Directive (EU) 2019/1937 and repealing Regulation (EU) No 517/2014*. *Official Journal of the European Union*