

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE UN SISTEMA DE ACUMULACIÓN DE CALOR POR CAMBIO DE FASE PARA CALEFACCIÓN DE VIVIENDAS

Fabio H. López¹, Alejandro L. Hernández¹

¹Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional (INENCO, UNSa – CONICET)
Consejo de Investigación de la Universidad Nacional de Salta (CIUNSa)
Av. Bolivia 5150, A4400FVY, Salta, Argentina.
Tel. 54-0387-4255579 – Fax 54-0387-4255489. E-mail: fabio.lopez129@gmail.com

Recibido 03/2025; Aceptado 04/2025

RESUMEN.- Este trabajo presenta el desarrollo y caracterización experimental de un prototipo de acumulador térmico utilizando materiales de cambio de fase (PCM) para su integración en un sistema de calefacción solar. Se utilizaron tres tipos de PCMs: grasa vacuna, cera de soja y estearina encapsulados en latas de aluminio recicladas con aletas metálicas y una capacidad teórica de almacenamiento de 16 MJ (60 Kg de PCM en total). Se registraron los perfiles de temperatura durante ciclos de carga y descarga. Se caracterizaron los rangos de temperaturas de fusión y solidificación de cada PCM, el fenómeno de subenfriamiento y los gradientes térmicos dentro del acumulador. Durante la carga, se determinaron eficiencias entre 10-30% dependiendo de las condiciones ambientales. En la descarga, se lograron mantener temperaturas de salida de aire superiores a 30°C por 5-8 horas. El sistema de calefacción logró mantener confortable un prototipo de vivienda por 7 días seguido.

Palabras clave: Acumulador térmico, materiales de cambio de fase (PCM), Calefacción de edificios, Energía solar.

ANALYSIS OF THE THERMAL BEHAVIOR OF A PHASE CHANGE HEAT STORAGE PHASE-CHANGE HEAT STORAGE SYSTEM FOR RESIDENTIAL HEATING

ABSTRACT.- This work presents the development and experimental characterization of a thermal storage prototype using phase change materials (PCM) for integration into a solar heating system. Three types of PCMs were utilized: beef fat, soybean wax, and stearin, encapsulated in recycled aluminum cans with metal fins, with a theoretical storage capacity of 16 MJ (a total of 60 kg of PCM). Temperature profiles were recorded during the charging and discharging cycles. The melting and solidification temperature ranges of each PCM, the subcooling phenomenon, and thermal gradients within the accumulator were characterized. During the charging phase, efficiencies between 10-30% were determined, depending on environmental conditions. During discharge, air outlet temperatures above 30°C were maintained for 5-8 hours. The heating system successfully kept a housing prototype comfortable for seven consecutive days.

Keywords: Thermal storage, phase change materials (PCM), building heating, solar energy.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes y motivación

La energía solar es un recurso intermitente que está sujeto a variaciones temporales y condiciones climáticas. Debido a esto, el almacenamiento de la energía generada a partir de dispositivos solares es fundamental para cubrir las demandas energéticas con cierto desfase respecto a la disponibilidad solar (Suberu, Mustafa y Bashir (2014)).

Los materiales de cambio de fase (PCM, en inglés) son una tecnología prometedora para el almacenamiento de energía térmica (Samykan (2022)). Sin embargo, estos materiales poseen características distintivas que afectan su desempeño en la acumulación de calor (Regin, Solanki y Saini (2008)).

Los acumuladores de energía térmica con PCM pueden almacenar tres veces más que los acumuladores de calor sensible para el mismo volumen del acumulador (Mehling (2008)).



Esta obra está bajo Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional.
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Una de las aplicaciones de los sistemas de calentamiento solar de aire es el calefaccionado de edificios. Esta aplicación contribuye a disminuir el consumo de energía eléctrica o gas para calefacción y reducir la emisión de gases de efecto invernadero (GEI, en inglés).

Aunque la inversión inicial de los sistemas de calefacción solar puede ser significativa, el ahorro en costos de energía a largo plazo compensa esta situación. En Duffie y Beckman (2013) se demuestra que los sistemas de calefacción solar pueden cubrir entre el 40% y el 70% de la demanda edilicia, dependiendo de la eficiencia del equipo y de las condiciones climáticas locales.

Los componentes básicos de sistemas de calefacción solar son los siguientes: colectores solares calentadores de aire, una unidad de almacenamiento de energía térmica y un intercambiador de calor.

1.2. Introducción a los sistemas de calefacción solar

En Ge et al. (2018) se muestra la conveniencia de utilizar aire como fluido caloportador para la calefacción solar de viviendas. Por otra parte, en Mofijur et al. (2019) se muestra que los materiales PCM son lo más adecuados para este propósito.

Durante la descarga de un acumulador con PCM los procesos de cambio de fase ayudan a mantener constante la temperatura del aire a la salida del acumulador. Esta resulta entonces más uniforme. Cuando se colocan múltiples tipos de PCM de forma tal que sus respectivos cambios de fase ocurren secuencialmente, a este tipo de acumulador lo denominamos acumulador por cambio de fase diferencial.

Durante la construcción de acumuladores de energía térmica a escala industrial, es fundamental considerar el costo del PCM. En este contexto, los PCM de grado técnico suelen ser los más adecuados desde el punto de vista económico.

1.3. Objetivos del estudio

El objetivo principal de este trabajo es la construcción y ensayo de un prototipo de un sistema de calefacción solar formado por un acumulador térmico por cambio de fase diferencial.

Además, se desea evaluar la capacidad de calefacción del sistema solar para elevar la temperatura del aire de un prototipo habitacional acoplado ubicado en la ciudad de Salta.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Diseño del acumulador térmico por cambio de fase diferencial

El prototipo construido posee un diseño cilíndrico para maximizar la transferencia de calor entre el PCM y el flujo de aire circundante. El patrón diferencial de los PCMs optimiza la eficiencia en la acumulación y liberación de la energía térmica.

La acumulación y liberación de energía de calor latente ocurre en tres momentos distintos según la ocurrencia de los cambios de estado de los tres PCMs. A saber, grasa vacuna, cera de soja y estearina. En cada cambio de estado la temperatura del PCM varía muy poco contribuyendo a la estabilidad de la temperatura del aire a la salida del acumulador y por tanto, de la habitación calefaccionada.

2.1.1. Descripción de los componentes del acumulador térmico

El cuerpo del acumulador es un tambor metálico de 200 litros, con dimensiones de 0.58 m de diámetro interno y 0.9 m de alto. En la parte superior del tambor se encuentra la entrada de aire. La entrada tiene un diámetro de 0.5 m y se adapta a la cañería de aire a través de una tobera de chapa. En el interior de acumulador se alojan los PCMs contenidos en latas de aluminio recicladas.

En el fondo del tambor metálico se encuentra una malla de alambre metálica que sostiene el lecho de PCM. El soporte de la malla metálica tiene una altura de 0.25 m. El mismo se apoya sobre dos tablas de madera de machimbre de 1.6 cm de espesor, que rompe el puente térmico entre el sistema soporte-malla-latas y el tambor metálico.

La unidad de acumulación está aislada térmicamente del exterior con espuma de polietileno en la superficie cilíndrica envolvente y con poliestireno expandido y lana de vidrio, en las partes de abajo y de arriba, respectivamente.

El tambor metálico está apoyado sobre una base aislante térmicamente de poliestireno expandido de 0.06 m de espesor y la envolvente del tambor está aislado térmicamente por cuatro vueltas de espuma de polietileno aluminizada de 0.01 m de espesor. El tanque también se encuentra aislado por dentro con dos vueltas de la misma espuma de polietileno aluminizada.

Una tobera de chapa galvanizada adapta el diámetro de la tubería de salida de aire al diámetro del tanque que se encuentra instalada en la parte inferior del mismo.

Un esquema del acumulador de energía térmica con PCM construido se muestra a figura 1.

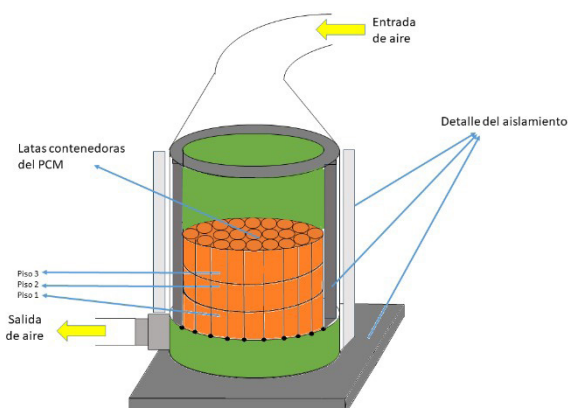


Fig. 1: Esquema del acumulador de energía térmica con PCM construido

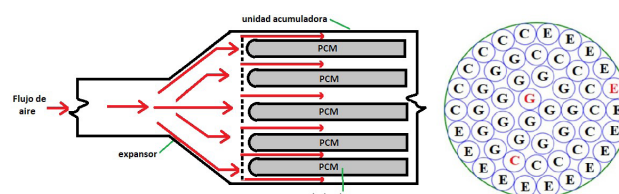


Fig. 2: Arreglo de los contenedores de PCM. G: grasa vacuna. C: cera de soja. E: estearina

2.1.2. Preparación del lecho de PCM

El acumulador posee 60 Kg de PCM en total, con 20 Kg de cada tipo de PCM. Cada lata contiene aproximadamente 400 gr de material, apiladas en tres niveles, totalizando entre ellos 144 latas. O sea, 48 latas en cada nivel. Como se dispone de 3 tipos de PCM diferentes, se planteó una distribución en 3 espiras de 16 latas cada una para cada tipo de PCM. La figura 2 muestra la distribución de los contenedores de PCM. Las latas en rojo indica que contiene una termocupla en su interior.

Debido a la baja conductividad térmica de los PCMs seleccionados, los mismos fueron encapsulados en contenedores de latas de aluminio recicladas. Además, para mejorar la transmitancia térmica de los contenedores, se instaló un inserto también de aluminio en las latas de PCM para potenciar la transferencia de calor entre el centro y la periferia de cada lata.

2.2. Instalación experimental del sistema de calefacción solar

2.2.1. Banco de colectores solares

Se utilizó un banco de colectores formado por dos colectores solares calentadores de aire de doble paso en contracorriente. El primer colector con dimensiones de 2.51 m de largo y 0.95 m de ancho y área útil de colección de 2.16 m². El segundo colector con dimensiones de 1.95 m de largo, 0.97 m de ancho y un área de colección de 2 m². En su interior poseen una matriz porosa para maximizar la transferencia de calor entre la placa absorbente y el aire circulante. Ambos colectores fueron desarrollados por el Grupo de Eficiencia Energética en Edificios del INENCO y fueron conectados horizontalmente en serie con una pendiente de 40° respecto del suelo.



Fig. 3: Banco de colectores solares calentadores de aire utilizados.

2.2.2. Esquema del sistema de calefacción solar

El sistema de calefacción solar utiliza un banco de colectores solares para capturar la energía del sol y transferirla al acumulador térmico. El proceso completo se describe de la siguiente manera:

Durante el proceso de carga, el banco de colectores solares de aire capta la energía del sol y la convierte en energía térmica del

aire a la salida del colector. Este aire se redirige hacia el acumulador térmico donde la energía se almacena en las latas con PCM. El aire enfriado por la transferencia de calor a las latas sale del acumulador y se dirige a la entrada del banco de colectores para comenzar un nuevo ciclo.

Durante el proceso de descarga, realizado durante la noche, un par de válvulas T desacoplan del circuito hidráulico a los colectores solares y conectan el acumulador con el local a calefaccionar. En este nuevo circuito cerrado el aire extrae calor de las latas con PCM y lo entrega al local durante toda la noche. El accionamiento de las válvulas T es manual y deben ser accionadas al final de cada ciclo de carga y de descarga del acumulador.

Un ventilador axial de 1/4 HP impulsa el aire a través de todo el sistema con un flujo másico de 0.02439 y 0.03193 Kg/seg, en la carga y en la descarga, respectivamente. El esquema de arriba de la siguiente figura muestra el sistema de calefacción solar operando durante el proceso de carga diurna y el de abajo muestra su operación durante la descarga nocturna.

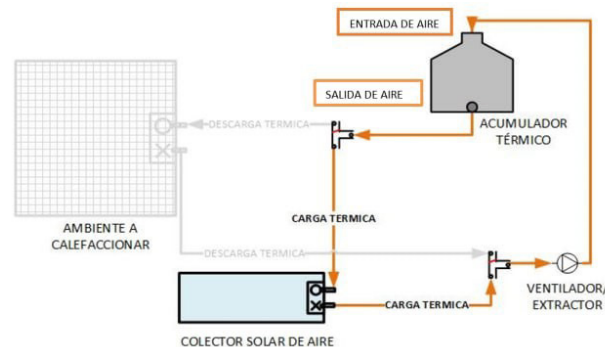


Figura 38: Esquema del sistema de calefacción solar acoplado a un ambiente

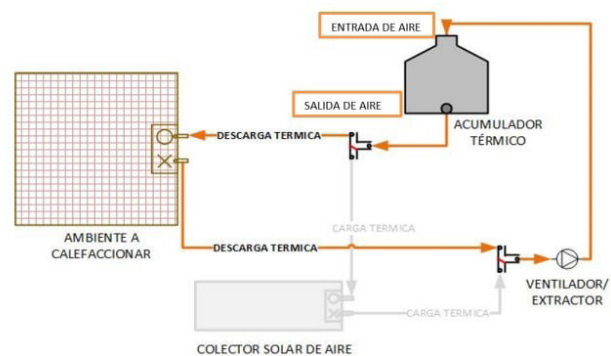


Figura 39: Esquema del sistema de calefacción solar acoplado a un ambiente

Fig. 4: Esquema del sistema solar durante los procesos de carga y descarga, a la izquierda y derecha, respectivamente.

2.3. Funcionamiento del acumulador térmico por cambio de fase diferencial

El esquema de funcionamiento del acumulador por cambio de fase diferencial se muestra en la figura 5.

Durante las horas previas al mediodía solar, la temperatura del aire de salida del colector alcanza los puntos de fusión de los materiales PCM en distintos momentos, fundiéndose

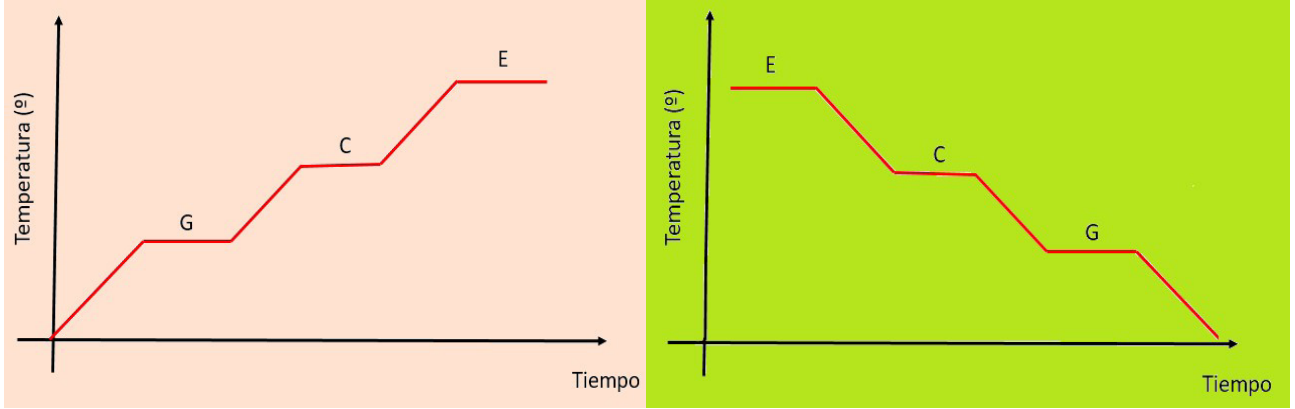


Fig. 5: Esquema de funcionamiento del acumulador por cambio de fase diferencial.

cada material a su tiempo a medida que el calor penetra por difusión en el PCM de cada lata. En cada proceso de fusión se acumula una gran cantidad de energía térmica a una temperatura constante. De las temperaturas de cambio de fase presentadas en la figura anterior, el orden de cambio de estado durante el proceso de fusión es: Grasa, Cera y Estearina. Después del mediodía solar, la temperatura de salida del colector desciende a medida que lo hace la radiación solar y los tres PCMs se solidifican en distintos momentos de la tarde. El orden de cambio de estado durante el proceso de solidificación es: Estearina, Cera y Grasa. Durante el ensayo, en general, se observó este patrón.

Esta forma de aprovechar la acumulación de calor por cambio de fase acoplada a colectores solares es más eficiente que el caso en el cual se utiliza un solo tipo de PCM ya que la temperatura de salida del colector es variable a lo largo del período diurno. Si se dispone de un solo material de cambio de fase, su punto de fusión y su único calor latente determinan la cantidad de calor total acumulada en cada proceso de carga. Si el punto de fusión es bajo como el de la grasa vacuna, todo el material se funde en las primeras horas del día y el resto del tiempo la acumulación térmica es por calor sensible en fase líquida. Por el contrario, si el punto de fusión es tan alto como el de la estearina, la acumulación térmica es por calor sensible en fase sólida hasta que, cerca del mediodía, se alcanzan los 55 °C aproximadamente y recién, a partir de allí, la acumulación térmica es por cambio de fase. Si el punto de fusión tiene un valor intermedio dentro del rango de calentamiento del colector, la acumulación de calor será primero por calor sensible en fase sólida, luego por cambio de fase y finalmente por calor sensible en fase líquida. Como es sabido, los montos de energía acumulada por calor sensible por unidad de masa son inferiores a los acumulados por calor latente por lo que, disponiendo del cambio de fase diferencial con tres PCM con distintos puntos de fusión dentro del rango de calentamiento de los colectores solares, se potencia y eficientiza el proceso de acumulación térmica por calor latente.

2.4 Cálculo de las eficiencias del sistema

Las ecuaciones de las energías y las eficiencias intervinientes

en los procesos de carga y descarga del acumulador, se presentan a continuación:

$$Q_{Util} = \dot{m}_{aire} C_{p-aire} (T_{S-Col} - T_{E-Col}) \Delta t \quad (1)$$

$$Q_V = \dot{m}_{aire} C_{p-aire} (T_{E-Acum} - T_{S-Col}) \Delta t \quad (2)$$

$$Q_{Util-v} = Q_{Util} + Q_V = \dot{m}_{aire} C_{p-aire} (T_{E-Acum} - T_{E-Col}) \Delta t \quad (3)$$

$$Q_{Alm,aire} = \dot{m}_{aire} C_{p-aire} (T_{E-Acum} - T_{S-Acum}) \Delta t \quad (4)$$

$$Q_{PCM} = m_{PCM} C_{PCM-s} (T_{fusión-PCM} - T_{i-PCM}) + m_{PCM} \lambda \quad (5)$$

$$+ m_{PCM} C_{PCM-l} (T_{f-PCM} - T_{fusión-PCM}) \quad (6)$$

$$Q_{Rad} = G_{solar} A_{colector} \Delta t \quad (7)$$

$$Q_{Desc,aire} = \dot{m}_{aire} C_{p-aire} (T_{S-Acum} - T_{E-Acum}) \Delta t \quad (8)$$

Tabla 1: Símbolos y significados.

EN LA CARGA	
$\dot{m}_{aire}$	Flujo másico de aire en [Kg/s], usando la expresión de la densidad en función de la temperatura media del aire en [kg/m ³].
λ	Calor latente de cambio de fase del material acumulador [J / Kg].
C_{PCM-s}	Calor específico en estado sólido del material acumulador [J Kg/°C].
C_{PCM-l}	Calor específico en estado líquido del material acumulador [J Kg/°C].
C_{p-aire}	Calor específico del aire a presión constante, en función de la temperatura media del fluido en ese proceso [J/Kg K].
T_{E-col}	Temperatura del aire a la entrada del colector solar [°C].
T_{S-col}	Temperatura del aire a la salida del colector solar [°C].
T_{E-acum}	Temperatura del aire a la entrada del acumulador térmico [°C].
T_{S-acum}	Temperatura del aire a la salida del acumulador térmico [°C].
G_{solar}	Irradiancia solar sobre el plano inclinado del colector [W/m ²]. Radiación que incide por segundo sobre una superficie determinada con la inclinación del colector.
$A_{colector}$	Área útil de colección del banco de colectores solares [m ²].
Q_{rad}	Energía diaria incidente sobre el plano del banco de colectores [J].
Q_{util}	Energía diaria producida por el banco de colectores [J].
Q_{util-v}	Energía diaria producida por colectores considerando aporte del ventilador [J].
Q_v	Energía diaria disipada por el ventilador [J].
P_{ot}	Potencia eléctrica entregada al ventilador [W].
$Q_{alm,aire}$	Energía almacenada por el aire durante el proceso de carga [J].
Q_{PCM}	Energía almacenada por el material PCM dentro del acumulador [J].
m_{PCM}	Masa del PCM [Kg].
T_{i-PCM}	Temperatura inicial del PCM [°C].
T_{f-PCM}	Temperatura final del PCM [°C].
$T_{fusión-PCM}$	Temperatura fusión del PCM [°C].
$\eta_{colector}$	Eficiencia diaria en la operación del colector.
$\eta_{colector-v}$	Eficiencia diaria en la operación del colector considerando aporte ventilador.
$\eta_{acumulador}$	Eficiencia diaria del acumulador considerando solamente calor acumulado por PCM.
$\eta_{acumulador2}$	Eficiencia diaria del acumulador considerando calor útil, calor ventilador y calor acumulado por PCM.
η_v	Eficiencia diaria del ventilador.
EN LA DESCARGA	
Δt	Intervalo de tiempo correspondiente [seg].
P_e	Potencia eléctrica consumida por el ventilador [W].
$Q_{Des,aire}$	Energía liberada por el aire durante el proceso de descarga [J].
$T_{hab-ent}$	Temperatura del aire a la entrada de la habitación durante el proceso de descarga [°C].
η_{acum}	Eficiencia del acumulador durante la descarga considerando calor útil, calor ventilador y calor acumulado por PCM.
$\eta_{sistema 1}$	Eficiencia del sistema de calefacción solar durante la descarga.
$\eta_{sistema 2}$	Eficiencia del sistema de calefacción solar durante la descarga.

Las variables utilizadas en las ecuaciones (1) a (16) se describen en la Tabla 1.

Para calcular las eficiencias de cada componente del sistema, se utiliza la expresión de “energía saliente/energía entrante” de cada uno de ellos. Durante el proceso de carga, se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$\eta_{Colector} = \frac{Q_{Util}}{Q_{Rad}} \quad (9)$$

$$= \frac{\dot{m}_{aire} C_{p-aire}(T_{S-Col}-T_{E-Col})}{G_{solar}A_{colector}}$$

$$\eta_{Colector-v} = \frac{Q_{Util-v}}{Q_{Rad}} \quad (10)$$

$$\eta_{acumulador} = \frac{Q_{PCM}}{Q_{Rad}} \quad (11)$$

$$\eta_{acumulador2} = \frac{Q_{Util-v}+Q_{PCM}}{Q_{Rad}} \quad (12)$$

Durante el proceso de descarga, se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$\eta_V = \frac{Q_V}{P_e} \quad (13)$$

$$= \frac{\dot{m}_{\text{aire}} C_{p-\text{aire}} (T_{S-\text{Acum}} - T_{\text{hab-ent}})}{186.43}$$

$$\eta_{\text{Acum}} = \frac{Q_{\text{PCM}}}{Q_{\text{útil-V}}} \quad (14)$$

$$\eta_{\text{Sistema 1}} = \frac{Q_{\text{Desc,aire}}}{Q_{\text{Rad}}} \quad (15)$$

$$= \frac{\dot{m}_{\text{aire}} C_{p-\text{aire}} (T_{S-\text{Acum}} - T_{E-\text{Acum}})}{G_{\text{solar}} A_{\text{colector}}}$$

$$\eta_{\text{Sistema 2}} = \eta_{\text{Colector}} \eta_V \eta_{\text{Acum}} \quad (16)$$

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Eficiencia del banco de colectores solares

Los resultados promedios de temperatura del aire a la salida, a la entrada, del ambiente y la radiación solar de los ensayos del banco de colectores solares se muestran en la tabla 2.

Observaciones:

- La máxima eficiencia diaria del sistema solar, considerando el calor útil generado por el banco de colectores, fue de 38.29 % el día 19 de septiembre de 2024. La máxima eficiencia del sistema solar considerando la energía acumulada por el PCM, además del calor útil, fue de 78.09 % el día 18 de septiembre de 2024.

- La energía promedio almacenada por el PCM fue de 10 MJ (16 MJ calculado en el diseño). Hubo una reducción de la energía almacenada debido a la longitud de los tubos y pérdidas térmicas.

- La temperatura máxima del aire de entrada al acumulador durante la carga fue de 74.4 °C. Esto se debe a las pérdidas

Tabla 2: Resultados del acumulador de energía térmica durante el proceso de carga.

Fecha	HORA INICIO	HORA FINAL	HORAS DE CARGA	Q Rad (MJ)	Q Útil (MJ)	Q Útil-V (MJ)	Q V (MJ)	Q al m.aire (MJ)	Q PCM (MJ)	Eficiencia col+vent	Eficiencia col	Eficiencia acum	Eficiencia Q _v +Q _{acm}
8/27/2024	9:34:00 a. m.	4:59:00 p. m.	7:25:00 a. m.	84.97	24.87	40.43	15.56	16.15	8.92	47.58%	29.27%	10.50%	58.08%
8/28/2024	9:37:00 a. m.	5:02:00 p. m.	7:25:00 a. m.	77.49	6.49	15.71	9.22	11.46	9.37	20.28%	8.38%	12.10%	32.38%
8/29/2024	9:33:00 a. m.	4:58:00 p. m.	7:25:00 a. m.	79.66	18.88	32.17	13.29	14.44	12.92	40.38%	23.70%	16.22%	56.60%
8/30/2024	10:05:00 a. m.	4:50:00 p. m.	6:45:00 a. m.	71.59	20.46	31.22	10.76	11.57	10.63	43.61%	28.58%	14.85%	58.47%
9/2/2024	9:40:00 a. m.	5:05:00 p. m.	7:25:00 a. m.	84.71	12.01	35.56	23.55	13.21	6.85	41.98%	14.18%	8.08%	50.07%
9/3/2024	10:00:00 a. m.	5:25:00 p. m.	7:25:00 a. m.	79.32	24.25	45.69	21.44	16.83	6.61	57.59%	30.57%	8.33%	65.93%
9/4/2024	9:35:00 a. m.	5:00:00 p. m.	7:25:00 a. m.	78.59	24.25	45.69	21.44	16.83	8.44	58.13%	30.85%	10.74%	68.87%
9/5/2024	9:30:00 a. m.	4:55:00 p. m.	7:25:00 a. m.	80.15	24.21	45.14	20.92	15.08	7.49	56.32%	30.21%	9.35%	65.66%
9/6/2024	9:45:00 a. m.	5:00:00 p. m.	7:15:00 a. m.	85.44	32.66	52.01	19.35	15.69	10.74	60.87%	38.22%	12.57%	73.44%
9/9/2024	9:30:00 a. m.	4:50:00 p. m.	7:20:00 a. m.	76.03	27.92	45.93	18.01	11.00	11.05	60.41%	36.72%	14.54%	74.95%
9/10/2024	9:35:00 a. m.	4:55:00 p. m.	7:20:00 a. m.	75.32	28.23	45.62	17.38	11.62	10.86	60.57%	37.49%	14.42%	74.99%
9/11/2024	9:35:00 a. m.	5:00:00 p. m.	7:25:00 a. m.	49.02	16.92	28.27	11.35	5.42	6.39	57.67%	34.52%	13.02%	70.70%
9/16/2024	9:35:00 a. m.	4:50:00 p. m.	7:15:00 a. m.	83.22	29.43	49.21	19.78	12.83	10.65	59.13%	35.36%	12.80%	71.93%
9/17/2024	9:20:00 a. m.	4:55:00 p. m.	7:35:00 a. m.	82.28	29.23	48.70	19.47	12.16	11.62	59.19%	35.53%	14.12%	73.31%
9/18/2024	9:05:00 a. m.	4:50:00 p. m.	7:45:00 a. m.	80.97	30.51	52.11	21.60	11.03	11.13	64.35%	37.68%	13.74%	78.09%
9/19/2024	9:20:00 a. m.	4:55:00 p. m.	7:35:00 a. m.	83.72	32.06	55.18	23.12	12.33	10.89	65.91%	38.29%	13.00%	78.91%
9/20/2024	9:20:00 a. m.	4:55:00 p. m.	7:35:00 a. m.	77.47	25.31	52.60	27.28	4.83	8.70	67.89%	32.68%	11.23%	79.12%
9/21/2024	9:40:00 a. m.	2:20:00 p. m.	4:40:00 a. m.	50.67	3.45	16.81	13.36	1.75	3.57	33.18%	6.81%	7.06%	40.23%
9/23/2024	9:40:00 a. m.	5:00:00 p. m.	7:20:00 a. m.	72.40	25.85	48.54	22.69	9.46	10.43	67.04%	35.71%	14.40%	81.44%
9/24/2024	9:40:00 a. m.	4:55:00 p. m.	7:15:00 a. m.	75.13	25.54	49.09	23.55	5.20	8.35	65.34%	33.99%	11.11%	76.45%
9/25/2024	9:50:00 a. m.	5:00:00 p. m.	7:10:00 a. m.	63.79	21.72	40.19	18.48	3.95	8.27	63.00%	34.04%	12.96%	75.97%
9/27/2024	9:20:00 a. m.	5:00:00 p. m.	7:40:00 a. m.	82.29	28.39	58.49	30.10	8.02	9.16	71.08%	34.50%	11.13%	82.21%
9/28/2024	8:25:00 a. m.	3:50:00 p. m.	7:25:00 a. m.	78.31	26.47	58.13	31.66	7.94	8.37	74.24%	33.81%	10.69%	84.93%
9/30/2024	10:00:00 a. m.	5:00:00 p. m.	7:00:00 a. m.	75.82	26.03	51.83	25.80	8.74	9.17	68.36%	34.33%	12.10%	80.46%
10/1/2024	9:40:00 a. m.	5:00:00 p. m.	7:20:00 a. m.	75.32	25.45	50.59	25.14	6.44	8.69	67.17%	33.79%	11.53%	78.70%
10/2/2024	12:35:00 p. m.	5:00:00 p. m.	4:25:00 a. m.	45.78	15.32	28.85	13.53	2.85	6.00	63.02%	33.46%	13.10%	76.12%
10/3/2024	9:30:00 a. m.	4:55:00 p. m.	7:25:00 a. m.	79.40	26.05	55.56	29.51	5.44	6.95	69.98%	32.81%	8.76%	78.73%
10/4/2024	9:35:00 a. m.	4:55:00 p. m.	7:20:00 a. m.	78.55	25.36	50.09	24.73	7.59	7.37	63.77%	32.29%	9.39%	73.15%
Promedio				75.26	23.48	43.91	20.43	9.99	8.91	58.15%	30.99%	11.85%	70.00%

de calor que ocurren a lo largo de las cañerías que conectan el colector, el ventilador y el acumulador.

- La temperatura máxima del aire de salida del acumulador durante la descarga fue de 45 °C.
- El salto térmico promedio del aire en el acumulador fue de 19.32 °C.
- La eficiencia del sistema solar se vio influenciada por los siguientes factores:
 - a) Aporte significativo del calor generado por el ventilador.
 - b) Pérdidas térmicas debido a la insuficiente aislación térmica en los ductos de aire.
 - c) Variaciones en la nubosidad y condiciones atmosféricas.

3.2. Resultados del sistema de calefacción solar durante la descarga

3.2.1. Curvas de temperaturas del sistema de calefacción solar

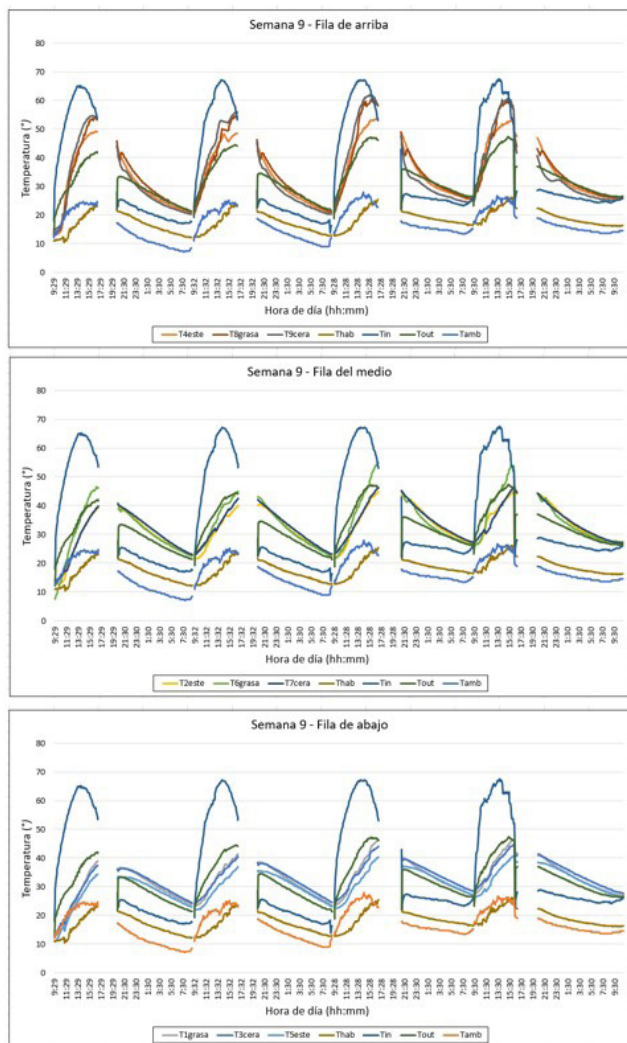


Fig. 6: Temperaturas medidas en la operación del acumulador para las distintas latas de PCM.

En las curvas de temperatura de los PCM de la figura 6 no se observa la meseta en la temperatura de salida del aire. Esto se debe a varios factores:

- Las latas de PCM están ubicadas verticalmente en distintas posiciones dentro del tanque, lo que modifica la transferencia de calor y, por tanto, el tiempo de solidificación en PCM de mismo tipo;
- Las distintas propiedades termofísicas de los PCM llevan a tiempos de fusión y solidificación de los PCM distintos para los distintos tipos de PCM;
- La tobera de entrada de aire no distribuye perfectamente el aire de entrada del acumulador al diámetro mayor de la unidad acumuladora, por lo que el perfil de temperatura del aire no es uniforme en sección transversal del tanque.

Debido a estos factores la temperatura de aire de salida resulta mayor que sin la presencia del material acumulador, pero sin las “mesetas” distintivas del cambio de fase debido a la ocurrencia simultánea de los fenómenos descritos.

3.2.2. Análisis del funcionamiento del sistema de calefacción solar

La siguiente figura presenta las temperaturas del aire de la habitación y del ambiente exterior para los casos con y sin calefacción.

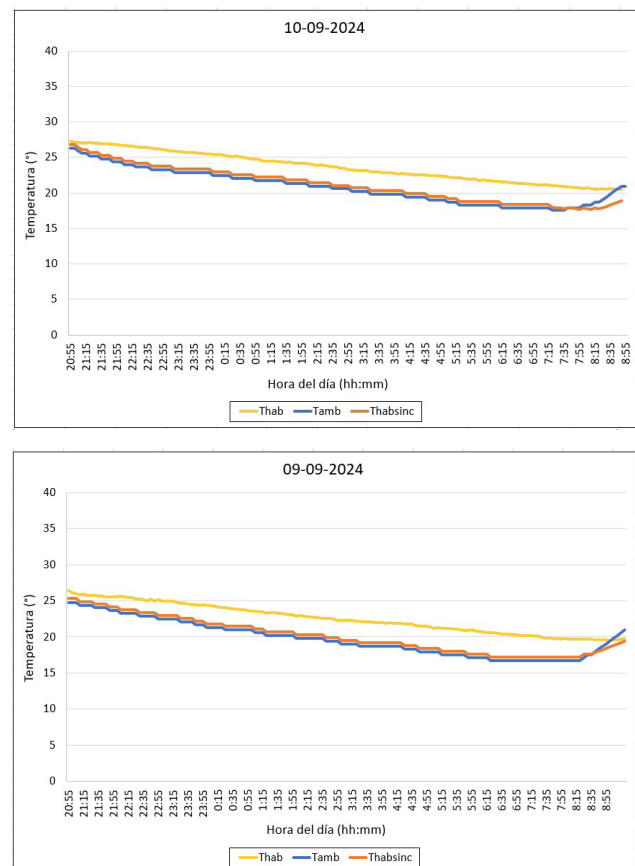


Fig. 7: Comparación de la temperatura del aire de la habitación durante la noche, en los casos con y sin el sistema de calefacción solar encendido.

Observaciones:

- Sin calefacción, en general, la temperatura dentro y fuera de la habitación. Esto es, la temperatura de la habitación sigue aproximadamente la temperatura exterior.
- Con calefacción, la temperatura mínima y promedio de la habitación se diferencian en 2.4 y 2.2 °C, con respecto a los valores mínimo y promedio de la temperatura ambiente exterior, respectivamente. Esto demuestra que el sistema de calefacción solar ensayado mejora el estado térmico interior en la habitación.
- A lo largo del ensayo, la temperatura del prototipo habitacional se mantuvo en promedio unos 4.25 °C por arriba de la temperatura ambiente durante la noche.
- Durante el proceso de descarga, el salto de temperatura del aire entre el ambiente exterior y la habitación fue máximo de 5.53 °C el día 01 de octubre de 2024, donde el salto de temperatura promedio es de 4.25 °C. Esta diferencia fue mínima el día 25 de septiembre, una mañana fría, con un valor de 2.6 °C.
- Con el sistema de calefacción solar ensayado, la temperatura de la habitación se mantiene siempre por encima de 15 °C.

Los resultados diarios del calefaccionamiento alcanzado en la habitación se presentan en la figura 8.

Durante el periodo del día 9 (06 de septiembre) hasta el día 15 (18 de septiembre) se observa que el sistema alcanzó el rango de confort térmico humano, aunque esta última tuvo un incremento adicional en la temperatura máxima de la habitación.

4. CONCLUSIONES Y TRABAJOS A FUTURO

Se desarrolló y caracterizó experimentalmente un prototipo de un sistema de calefacción solar utilizando como PCMs: grasa vacuna, cera de soja y estearina.

Se implementó un desarrollo tecnológico de contenedores de latas de aluminio recicladas y aletas metálicas para mejorar la conductividad térmica de los PCMs.

Durante la carga, el acumulador térmico demostró una capacidad de almacenamiento de 10 MJ, el 62.5% del valor teórico calculado en el diseño (16 MJ). La diferencia se atribuye principalmente a pérdidas térmicas en las conexiones y a la longitud de los tubos.

Durante la carga, la eficiencia diaria promedio del acumulador fue del 70 %, lo que demuestra el potencial de almacenamiento de la energía solar en la unidad acumuladora.

Durante la descarga, el sistema logró mantener temperaturas interiores por encima de 15 °C, proporcionando confort térmico humano por siete 7 días consecutivos.

A pesar de no observarse el comportamiento diferencial, el acumulador logró mantener temperaturas de salida de aire superiores a 30°C por 5-8 horas.

El banco de colectores solares mostró una eficiencia promedio del 31%, valor que se ve limitado por las altas temperaturas del aire dentro del circuito de tuberías.

4.1. Contribuciones científicas

- El estudio presenta una caracterización experimental de un sistema de almacenamiento térmico real por cambio de fase diferencial para trabajar acoplado a calentadores solares de aire.
- Se demostró la viabilidad de utilizar PCM comerciales como materiales de almacenamiento térmico en sistemas de calefacción solar.
- El prototipo de acumulador térmico con distintos materiales de cambio de fase demostró un alto potencial para el calefaccionamiento solar de viviendas, con capacidad de mantener las condiciones de confort térmico.

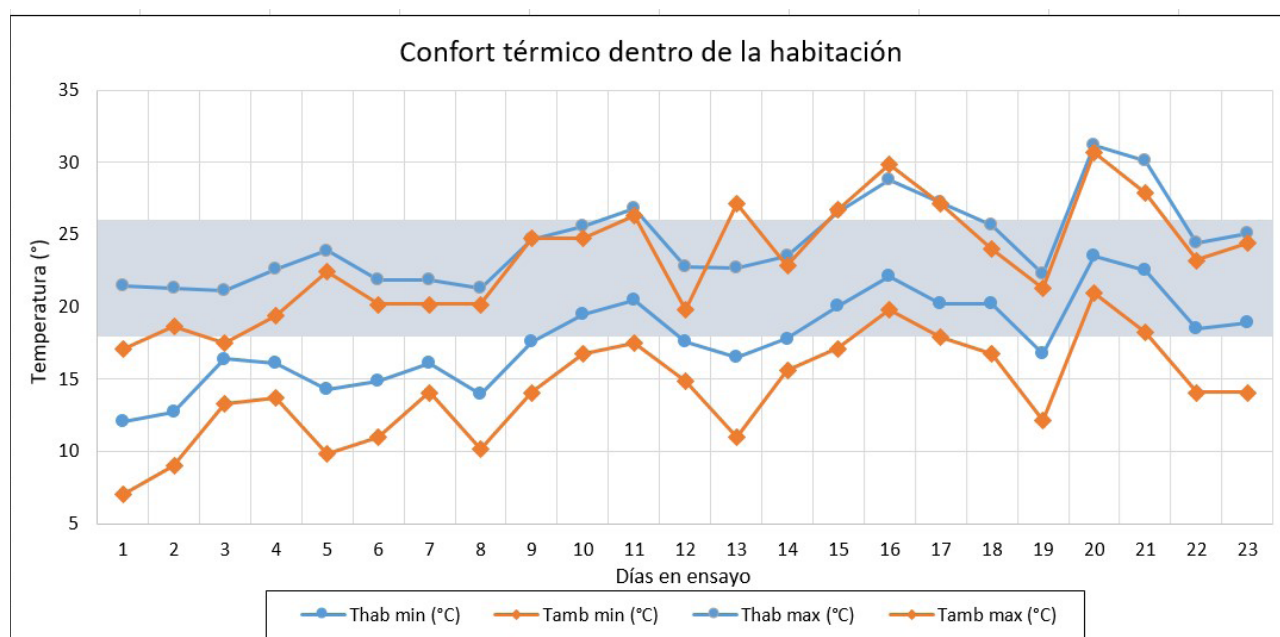


Fig. 8: Temperaturas mínimas y máximas del ambiente exterior y de la habitación considerando sólo las horas de descarga

4.2. Trabajos Futuros

- El estudio reveló una caída de temperatura promedio de 11°C entre la salida del acumulador y la entrada al prototipo habitacional, lo que indica la necesidad de mejorar el aislamiento térmico en el circuito de tuberías.
- Explorar otras combinaciones de PCM para optimizar el rango de temperaturas de operación.
- Analizar el comportamiento del sistema a largo plazo.

REFERENCIAS

- Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). Solar radiation. *Solar engineering of thermal processes*, 4, 3-42.
- Suberu, M. Y., Mustafa, M. W., & Bashir, N. (2014). Energy storage systems for renewable energy power sector integration and mitigation of intermittency. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 35, 499-514.
- Ge, T. S., Wang, R. Z., Xu, Z. Y., Pan, Q. W., Du, S., Chen, X. M., ... & Chen, J. F. (2018). Solar heating and cooling: Present and future development. *Renewable energy*, 126, 1126-1140.
- Mehling, H., & Cabeza, L. F. (2008). Heat and cold storage with PCM. *Heat and mass transfer*, 11-55.
- Mofijur, M., Mahlia, T. M. I., Silitonga, A. S., Ong, H. C., Silakhori, M., Hasan, M. H., ... & Rahman, S. A. (2019). Phase change materials (PCM) for solar energy usages and storage: An overview. *Energies*, 12(16), 3167.
- Samykano, M. (2022). Role of phase change materials in thermal energy storage: Potential, recent progress and technical challenges. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 52, 102234.
- Regin, A. F., Solanki, S. C., & Saini, J. S. (2008). Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(9), 2438-2458.