

Validation of a Phase Change Material in a Cell for a Thermal Energy Storage System Using CFD

Callender Diego¹ ; Vera Simon, MSc² ; Asuaje Miguel, PhD³ ; Alvarez Rafael, MSc⁴ ; Rodriguez Maria, MSc⁵ 

¹³ Universidad Metropolitana, Caracas, Venezuela, diego.callender@correo.unimet.edu.ve; masuaje@unimet.edu.ve

²⁴⁵ Universidad Metropolitana, Caracas, Venezuela, yvera@unimet.edu.ve; ralvarez@unimet.edu.ve; marodrigezded@unimet.edu.ve

Abstract –

“The global need to transition to renewable energy has intensified the demand for innovative solutions. However, these solutions must be not only sustainable but also efficient, as outlined in Sustainable Development Goal 7 (Affordable and Clean Energy). This research addresses the challenge of analyzing paraffin as a stable and temperature-resistant phase change material (PCM) for use in thermal energy storage systems. Such systems are often designed for water heating in households without access to electricity or fuel, aligning with the Sustainable Development Goals. Currently, the share of renewable energy in global total energy consumption increased from 16.7% in 2015 to 18.7% in 2021. This growth reflects the rising adoption of these new technologies, which play a leading role in energy production. Efforts have been made to optimize and enhance their efficiency, with the use of PCMs in such systems being one promising solution. The experiment conducted utilizes paraffin as a PCM in a water-containing cell, where the heat exchange between the paraffin and water was evaluated. This model is applied to solar panel-powered water heating systems, and we assessed the feasibility of using paraffin in these applications. To evaluate and verify its performance, reference working fluids and operating conditions were adopted.”

Keywords – PCM, TES, solidification/melting, CFD, SDGs.

NOMENCLATURE

TES: Thermal Energy Storage
 PCM: Phase Change Material.
 SDG: Sustainable Development Goal.
 LH: Latent Heat.
 COP: Coefficient of Performance.
 CFD: Computational Fluid Dynamics
 T: Temperature [°C].
 v: Specific Volume [m³/Kg].
 μ: Viscosity [kg/m.s].
 k: Thermal conductivity [W/mK].
 Cp: Specific Heat [kJ/kg.K].
 ρ: Density [kg/m³].
 U: Overall Heat Transfer Coefficient [W/m²K].

Validación de un Material de Cambio de Fase en una Celda para un Sistema de Almacenamiento de Energía Térmica Mediante DFC

Callender Diego¹ ; Vera Simon, MSc² ; Asuaje Miguel, PhD³ ; Alvarez Rafael, MSc⁴ ; Rodriguez Maria, MSc⁵

¹³ Universidad Metropolitana, Venezuela, diego.callender@correo.unimet.edu.ve; masuaje@unimet.edu.ve

²⁴⁵ Universidad Metropolitana, Venezuela, yvera@unimet.edu.ve; ralvarez@unimet.edu.ve; marodriguezded@unimet.edu.ve

Resumen – “La necesidad de la transición global hacia las energías energéticas renovables ha intensificado la necesidad de soluciones innovadoras, pero esta no solo tiene que ser sostenible, tiene que ser eficiente, lo explica el Objetivo de Desarrollo Sostenible 7 (Energía Asequible y no Contaminante). Esta investigación aborda el desafío del análisis de la parafina como material de cambio de fase (MCF) estable y resistente a los cambios de temperatura, para su uso en sistemas de almacenamiento de energía. Suelen ser destinados a la calefacción de agua en hogares sin acceso a electricidad o combustible los cuales están alineados con los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Actualmente, la proporción de la energía renovable en el consumo total de energía del mundo pasó del 16.7% en 2015 al 18.7% en 2021, esto presenta un aumento del uso de estas nuevas tecnologías, al poseer un papel protagonista en la producción de energía, se han planteado formas de optimizarlas y hacerlas más eficientes, siendo unas de las soluciones el uso de Materiales de Cambio de Fase en estos sistemas. El experimento realizado utiliza la parafina como MCF para una celda que contiene agua, donde se evaluó el intercambio de calor que hay entre la parafina y el agua. Siendo este modelo usado en sistema de calentadores de agua con un funcionamiento de paneles solares, y evaluamos la factibilidad del uso de la parafina en estos sistemas. Para evaluar y comprobar su rendimiento, se adoptaron los fluidos de trabajo y condiciones de operación de referencia”.

Palabras clave - Materiales de Cambio de Fase (MCF), Almacenamiento de Energía Térmica (AET), solidificación/fusión, CFD, ODS.

NOMENCLATURA

AET: Almacenamiento de Energía Térmica.

MCF: Material de Cambio de Fase.

ODS: Objetivo de Desarrollo Sostenible.

CL: Calor Latente.

COP: Coeficiente de Desempeño.

DFC : Dinámica de Fluidos Computacional

T: Temperatura [°C].

v: Volumen Especifico [m³/Kg].

μ : Viscosidad [kg/m.s].

k: Conductividad Térmica [W/mK].

Cp: Calor Especifico [kJ/kg.K].

ρ : Densidad [kg/m³].

U: Coeficiente Global de Transferencia de Calor [W/m²K].

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, se buscan activamente nuevas formas de producción de energía, puesto que los métodos convencionales contribuyen significativamente al cambio climático. Sin embargo, la transición hacia un sistema energético sostenible no solo depende de la generación con fuentes renovables, sino también de la optimización en el uso de la energía, siendo la eficiencia energética un pilar complementario, ya que permite maximizar el producido por unidad de energía consumida [1]. Según cifras de las Naciones Unidas, estos sistemas representan aproximadamente el 60% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero. [1]. Basado en la los reportes que ofrecen la Agencia Internacional de la Energía (IEA, por sus siglas en inglés International Energy Agency) los países que siguen las normas planteadas por los programas de Normas y Etiquetado de Eficiencia Energética (en inglés conocido como *Energy efficiency standard and labelling*, EES&L) logran acelerar significativamente las mejoras en el desempeño energético de los equipos y electrodomésticos, la adopción de estas EES&L pueden multiplicar por dos o tres la mejor anual en la eficiencia de electrodomésticos lo cual representa una reducción promedio del 10 al 30%. Posicionando así a los programas EES&L como unas de las herramientas más eficientes para promover la transición hacia el uso de energía más sostenible Teniendo en cuenta que estos electrodomésticos son responsables de más de la mitad del gasto eléctrico en los hogares de los países donde se rige esta normativa, la mejora continua de su eficiencia energética abre una posibilidad de ahorro de gran magnitud, siendo esta de 3500 TWh al año [2]. Si bien se han implementado políticas dirigidas a reducir este consumo energético, aún queda trabajo por hacer para lograr los Objetivo de Desarrollo Sustentable (ODS) 7.2 “aumentar considerablemente la proporción de energía renovable en el conjunto de fuentes energéticas” y la ODS 7.3 “duplicar la tasa mundial de mejora de la eficiencia energética” [1].

Latinoamérica se enfrenta con una dualidad energética estructural, las principales industrias concentran el consumo energético y a menudo dependen de redes extensas, mientras que también existen muchos sectores geográficamente aislados y con acceso limitado o nulo a la red eléctrica convencional. En este contexto, los sistemas de almacenamiento de energía térmica AET surgen como una

tecnología estratégica y viable para abordar ambos frentes, una eficiencia en zonas interconectadas y la autonomía energética sostenible en zonas un poco más aisladas[3]. Estos sistemas actúan como una reserva estratégica de calor, almacenando energía térmica en momentos de alta producción o baja demanda, y liberándola durante picos de consumo o escasez. De esta manera, equilibrando el sistema y optimizando de forma significativa el consumo energético general.

Los Materiales de Cambio de Fase (MCF) optimizan sistemas energéticos mediante el AET mediante el calor latente (CL), que se puede incorporar tanto en sistemas estructurales, como muros y techos, como a intercambiadores de calor o unidades de almacenamiento de energía [4]. Esta tecnología se fundamenta en capturar energía térmica en exceso durante periodos de baja demanda o generación en exceso, almacenando esta energía mediante el cambio de fase del material, para liberarla de manera controlada en momentos de déficit o mucha demanda en forma de CL. De este modo, se logra una optimización e intensificación del flujo de energía disponible, este proceso no solo maximiza el aprovechamiento de los recursos, sino que fortalece la resiliencia del sistema al reducir su dependencia de fuentes convencionales de energía. Junto a esto, el CL es la propiedad física clave en el almacenamiento de energía térmica, ya que es la cantidad de energía térmica que un material intercambia con su entorno durante un cambio de fase, es decir, mientras transita entre dos estados de agregación, sólido y líquido en este caso, sin que se produzca una variación en su temperatura [5]. Los MCF son seleccionados específicamente por alto CL de fusión/solidificación y por presentar un cambio de fase en un rango de temperatura útil para la aplicación deseada. [6].

El primer registro documentado del uso de un (MCF) con fines de acumulación térmica data de Massachusetts. En 1948, la Dra. Maria Telkes, investigadora del Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT), basándose en el sistema desarrollado por Edward S. Morse en 1881, implementó en su vivienda tambores metálicos cargados con sal de Glauber, como componente de un sistema de calefacción solar pasivo [7]. Gracias a este diseño, Dover House logró mantenerse caliente únicamente mediante energía solar a lo largo de dos inviernos y medio.

P. Mehta et al, diseñaron un nuevo sistema de almacenamiento de energía térmica (Por sus siglas en inglés TESS, *Thermal energy storage system*) mediante un montaje como se muestra en la Fig. 1, utilizando MCF y ver su rendimiento en bajas temperaturas.

Donde reportaron que en comparación con los sistemas de MCF individuales, el sistema de MCF en cascada mostró un aumento del 30% en la eficiencia energética y una mejora del 100% en la eficiencia de transferencia de calor [8].

P. Jancik et al, realizaron un modelo experimental a escala para evaluar cápsulas de MCF cilíndricas con parafina como se muestra en la Fig. 2. Las comparaciones de la densidad energética almacenada era 9% mayor comparándolo con un diseño similar sin el MCF [9]

P Jancik et al, estudiaron cómo los MCF son una de las formas de las cuales se puede optimizar los procesos de intercambio de calor de forma experimental. Esto se realizó mediante un modelo computacional, por lo que se decidió levantar un diseño experimental como se muestra en la Fig.

3, para operar a condiciones reales y cualquier variable que no se haya podido verificar en el modelo computacional. Encontrando que con la incorporación del uso de MCF, los sistemas son más pequeños, menos costosos y más eficientes con respecto a los que no los tienen [10].



Fig. 1 Montaje experimental del TESS. Fuente: Metha (2025)

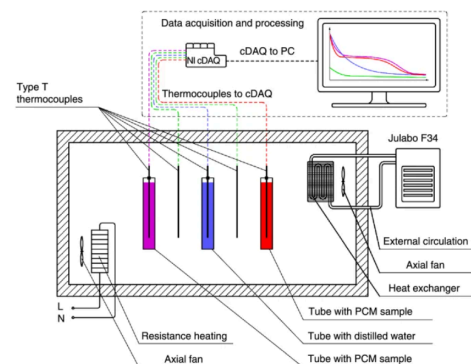


Fig. 2 Esquema del equipo experimental. Fuente: Kouba (2021)



Fig. 3 Diseño Experimental creado. Fuente: Syrovátka (2022)

Entre los niveles de temperatura de 15 °C y 55 °C puede almacenar 64.2 kWh/m³ y puede recuperar entre el 47% y 79% del calor almacenado [10].

Van Hap et al, este estudio numérico desarrolló y validó experimentalmente un modelo matemático bidimensional y transitorio para un colector de aire el cual usaba la parafina

como MCF. Los resultados demostraron que el uso del MCF fue decisivamente beneficioso. Primero optimizó la estabilidad y uniformidad del suministro térmico, permitiendo una salida de temperatura más uniforme. Extendió considerablemente el periodo de operación útil y la sinergia del MCF con aletas rectangulares longitudinales en la placa absorbidora potenció la transferencia de calor aumentando la eficiencia del colector hasta en un 13.7% [11].

G. Desai Sheketa et al, al plantear modelo matemáticos complejos, surge como posibilidad el análisis de estos sistemas mediante herramientas computacionales, las cuales permitirán tener una visión más amplia de estos fenómenos y que puntos se podrían producir para poder planear estrategias correctivas, así como a minimizar las pérdidas térmicas [6]. Se centraron en modelar computacionalmente, mediante ANSYS Fluent® el proceso de fusión y solidificación de un MCF para el AET. La simulación analizó la fracción líquida, los tiempos de fase y la distribución de temperatura, considerando los factores críticos como la radiación solar, la conductividad térmica y el CL. Los hallazgos demuestran que el uso de MCF, específicamente parafina, es muy ventajoso, [12].

A. Ghodrati et al, se planteó el diseño de un sistema híbrido avanzado que integra múltiples tecnologías renovables y de almacenamiento para climatización como se muestra en la Fig. 4, minimizando la dependencia de la red eléctrica convencional. Este estudio concluye que los MCF actúan como un componente clave en la transición hacia sistemas energéticos resilientes y descentralizados, al proporcionar un AET de alta densidad la cual estabiliza la operación del sistema y una mejor autonomía energética[13].

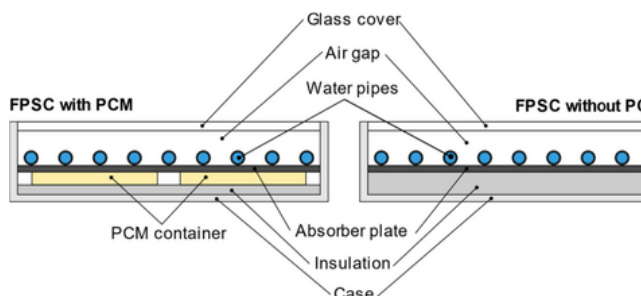


Fig. 4 Representación del Diseño propuesto. Fuente: Mirhosseini (2024)

En el marco de la transición energética, se están investigando diversos MCF. Su implementación aún plantea interrogantes importantes, relacionados principalmente con los fenómenos de transferencia de calor [6]. La aplicación de los MCF enfrentan desafíos significativos para la eficiencia energética, derivado de fenómenos no lineales y complejos de la transición del cambio de fase, movimiento impredecible de la interfaz sólido-líquido, los cambios de volumen inciertos y comportamientos estructurales durante el cambio de fase, especialmente en la solidificación, así como la formación de huecos o cavidades [14]. Estas dinámicas reducen la tasa de transferencia de calor durante los ciclos de fusión y solidificación, limitando la capacidad del sistema para almacenar y liberar energía de forma eficaz. Como consecuencia, se compromete el potencial de ahorro energético que ofrecen los MCF.

En virtud de lo anteriormente expuesto, este estudio propone la simulación CFD de un MCF bajo las condiciones operativas experimentales de un intercambiador de calor. La geometría seleccionada para el caso de estudio fue de tubo y coraza, tal como plantean Rauch [15] y Guevara [16]. La integración de la herramienta de ANSYS Fluent® complementa de manera decisiva el análisis de los fenómenos físicos, al ofrecer una visión continua de todo el dominio computacional, en lugar de limitarse a mediciones puntuales. Esto permite explicar con mayor profundidad y detalle los comportamientos ya descritos, al tiempo que posibilita analizar y visualizar parámetros inaccesibles experimentalmente, como perfiles de temperatura, presión y de velocidad. Así, la simulación no solo valida los datos empíricos, sino que expande radicalmente la capacidad de comprensión y análisis del problema de estudio.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Dominio de la simulación.

La geometría de trabajo usada en el experimento fue un diseño de tubos y coraza, con un arreglo triangular, común en los tanques de agua que utilizan calentamiento con paneles solares; se ha demostrado que la aplicación de esta configuración logra tanto una baja dependencia de fuentes convencionales de energía como sistemas más eficientes [15].

Para iniciar el desarrollo de la simulación, se dimensionó el dominio de trabajo, como se muestra en la Fig. 5, caracterizado de la siguiente manera:

- Una coraza de material PVC, la cual posee dimensiones de 85 mm de diámetro externo y 75 mm de diámetro interno por 190 mm de alto, el cual contiene el volumen de agua, así como los tubos de aluminio con el volumen del MCF.
- Tubos internos de aluminio que poseen dimensiones de diámetro externo de 16 mm y diámetro interno de 14 mm, con una altura de 185 mm, estos contienen el volumen del MCF representado con color rojo en la Fig. 5.
- Las termocupas fueron ubicadas en los puntos como se muestra en la Fig. 5, estas fueron colocadas para en los experimentos para monitorear las temperaturas de cada uno de estos volúmenes [16].

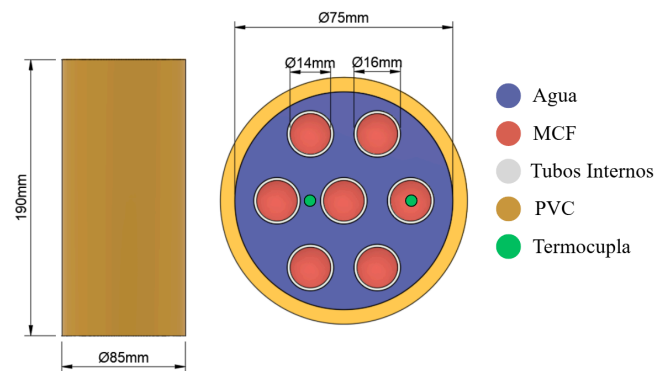


Fig. 5 Representación del Sistema

B. Discretización del Dominio (mallado)

La forma geométrica cilíndrica que tiene el dominio permitió realizar un *inflexion* en cada cuerpo del MCF, el cual tiene siete (7) capas con un índice de crecimiento de 1.2. Se trató de evitar nodos amorfos en el mallado, por lo que se realizó *edge sizing* en el volumen de agua como se muestra en la Fig. 6 para tener un reporte de datos en una menor cantidad de tiempo [18].

Se crearon tres (3) mallas diferentes (gruesa, media y fina), estos mallados se presentan en la Tabla I donde se muestra el número de elementos y nodos por malla

TABLA I
Mallado

Mallas	#Nodos	#Elementos	Error
Gruesa	79739	66339	3.246%
Media	121382	236773	0.960%
Fina	279768	509280	0.491%

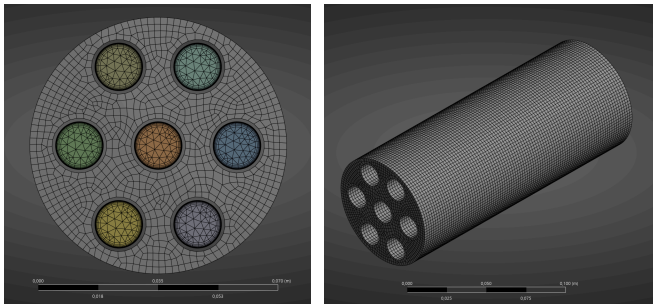


Fig. 6 Mallado del Sistema

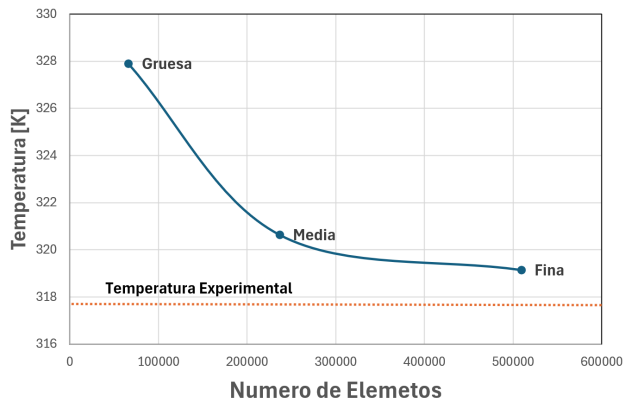


Fig. 7 Independencia de Malla de la Simulación

Como se muestra en la Figura 7, se garantiza la precisión y fiabilidad de la simulación, mediante el análisis de convergencia de malla, demostrando así que los resultados del modelo son independientes de la discretización geométrica. Para evaluar este comportamiento, se realizaron simulaciones con las tres mallas mostradas en la Tabla I, en las mismas condiciones de operación.

Observando de esta manera un comportamiento asintótico claro, a medida que se aumentaba la cantidad de elementos en el modelo, el valor de la temperatura final

obtenida en la simulación convergía hacia el valor experimental reportado.

Se utilizó la herramienta *inflexion* así logrando tener una mayor cantidad de elementos en las paredes de contacto de la parafina y el agua con los tubos, esto permite apreciar de mejor manera el intercambio de calor producido en estas secciones [18].

C. Materiales y fluidos

S

La Tabla II resume las propiedades de los fluidos utilizados en el desarrollo de los casos de estudio [5][6].

TABLA II
Propiedades del Agua y de la Parafina (MCF).

Agua				MCF	
T (K)	ρ (kg/m ³)	ν (m ² /kg)	Cp (J/kg°C)	T (K)	ρ (kg/m ³)
298.15	997,0089	0,001003	4226	298	0.5235
308.15	994,0357	0,001006	-	300	0.5213
318.15	990,0990	0,00101	4182	400	0.3910
328.15	985,2217	0,001015	4181	500	0.3128
338.15	980,3912	0,00102	-	600	0.2606
348.15	974,6587	0,001026	4194	-	-

Para simplificación del modelo computacional, se adoptó una conductividad térmica constante del agua, con un valor de 0,6 W/(m.K), la conductividad térmica del aluminio se mantuvo constante con un valor de $k = 209,3$ W/(m.K) y la conductividad térmica del PVC con un valor de $k = 0,12$ W/(m.K) [5].

Esta aproximación se justifica, al considerar que, dentro del rango de temperaturas operacionales del sistema estudiado, la variación de esta propiedad es mínima.

Las propiedades de la parafina como el Calor específico a presión constante (Cp), conductividad térmica, y la viscosidad están constantes con valores de 4,68 J/(Kg.K), 0,21 W/(m.K) y 1,2985e-5 kg/(m.s), respectivamente [15].

D. Parámetros de la Simulación y Condiciones de Borde

La Tabla III resume los parámetros numéricos generales considerados para realizar las simulaciones tanto con agua como con el MCF.

Alineado con las condiciones de operación del experimento [16], se simuló el proceso de enfriamiento del agua y como este se ve afectado por el efecto de MCF. Inicialmente el agua se encontraba a una temperatura de 60°C y la parafina se encontraba a 25°C como se muestra en la Tabla IV. Se realizó una analogía eléctrica para que desde el MCF hacia afuera establecer el coeficiente global de transferencia de calor (U) entre el MCF y el agua, considerando el intercambio de calor que puede tener el sistema hacia el ambiente; esto fue útil ya que al analizar el sistema de esta manera, se realizaron simplificaciones, debido a que cada tubo tiene la misma geometría lo que

permitió trazar en cada uno de ellos el mismo volumen de control [16].

TABLA III
Resumen de las condiciones de la Simulación

Parámetro	Especificación
Fluido	Agua / Parafina
Modelo de Turbulencia	Kappa - Epsilon
Condiciones	Transitorio
Criterio de Parada	14400 iteraciones
Modelo Viscoso	Laminar

TABLA IV
Condición de Borde del Caso de Estudio.

Caso	Temperatura Agua	Temperatura MCF	Temperatura Externa	Coef. Transf. Global $[W/m^2K]$
I	60 °C	25°C	25°C	1.511775

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Una vez realizado el análisis del proceso de enfriamiento del agua y transferencia de calor entre el agua y en MCF en la celda, se estableció un tiempo de simulación de 14400 s (4 horas). Este criterio de parada se seleccionó por ser lo suficientemente extenso como para que los perfiles de temperatura de ambos fluidos mostraran una clara tendencia hacia el equilibrio térmico.

Junto a esto, se realizó un reporte de temperatura en la superficie de cada uno de los fluidos, donde los puntos de reporte agregados en ANSYS Fluent® fueron tratados de ser colocados en los mismos lugares que las termocupas del

experimento, al poseer incertidumbre de saber el punto exacto donde se realizó la medición de la temperatura, en la Fig. 7, este análisis permitió observar el intercambio de calor que hubo entre el agua y el MCF, además de reflejar cómo el ΔT entre los dos fluidos era cada vez más pequeño. Pero para analizar de una forma comparativa todo el proceso de intercambio de calor, se decidió analizar el comportamiento promedio de la temperatura de los fluidos en su totalidad, es decir, la temperatura promedio de los volúmenes de agua y MCF, como lo refleja la Fig. 7.

En esta Fig. 7 se refleja de una mejor manera el fenómeno de transferencia de calor entre el agua y el MCF siguiendo los principios termodinámicos. Para este sistema, el proceso continuará hasta que se alcance el equilibrio térmico, momento en el cual las temperaturas de ambos deberán mantener esta tendencia por todo el proceso de enfriamiento [5][6].

Comparando estos resultados con lo reportado por Guevara [17], se pudo establecer una relación, entre lo reportado experimentalmente y los datos reportados por la simulación, en la Fig. 8 se evidencia como la temperatura del agua decrece en función del tiempo, tomando los datos en el mismo punto para que la comparativa sea lo más objetiva posible y así lograr hacer una validación del levantamiento computacional realizado del experimento. La validación se ejecutó mediante la comparación de las temperaturas reportadas de cada caso para el mismo intervalo de tiempo para puntos homólogos en el dominio. Específicamente, se compararon las lecturas de las termocupas experimentales con los valores de la temperatura obtenidos de la simulación. Se observó que ambas curvas exhiben una misma forma característica: decrecen inicial rápido, seguido un cambio de tendenc

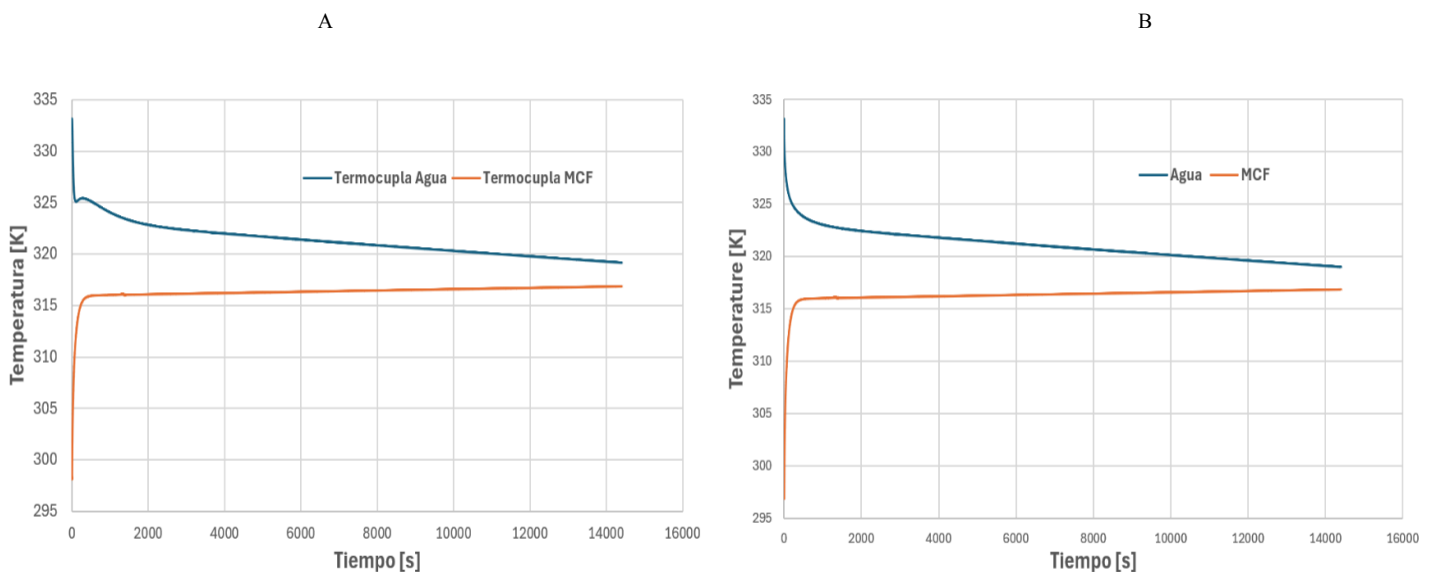


Fig. 8 Valores de Temperatura reportadas por Ansys, **A** representa la temperatura registrada en los puntos de termocupas, **B** representa el promedio de la temperatura registrada por todo el volumen de cada fluido.

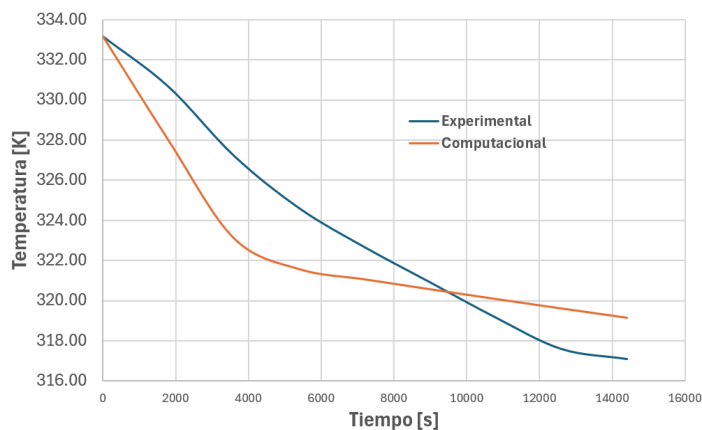


Fig. 9 Temperatura Registrada por la Termocupla en el Agua en ANSYS y en el Experimento.

Después, se compararon los puntos finales de ambas curvas de la Fig. 8, al evaluar los resultados podemos identificar una desviación del ~1% entre los resultados reportados.

Mientras el experimento ofrece datos en puntos discretos, la simulación proporciona un campo completo para el análisis de la temperatura. Esto nos permite visualizar el fenómeno en cualquier punto del dominio, identificando gradientes y patrones de flujo que podrían no ser capturados por mediciones puntuales.

En las Fig. 9, 10 se muestran los contornos de temperaturas y fracción de líquido en una serie de planos ubicados en el centro del sistema de manera transversal y longitudinal. Donde se muestran aspectos relevantes que se presentaron en el proceso:

- En la Fig. 9 se presentan los contornos de temperatura del agua durante el proceso de transferencia de calor, donde en estas se puede evidenciar como el intercambio de calor sucede de forma radial en cada uno de los volúmenes de control del MCF, el agua inicia con una temperatura de 60°C y para los 10 s, se observa la formación del gradiente de temperatura. Donde más adelante en el tiempo se identifica un gradiente con una forma constante durante todo el proceso de enfriamiento. Analizando esta tendencia, el sistema alcanzará el equilibrio térmico, no solo entre los dos fluidos, sino que también tenderá a alcanzar el equilibrio térmico con el medio ambiente..
- Para la Fig. 10 se presentan los contornos del MCF durante este mismo proceso, reflejando en este contorno el fenómeno de cambio de fase, mostrando claramente cómo a medida que el sistema cede calor al MCF comienza la transición de fase progresiva en las partes más calientes, iniciando en la paredes. El análisis del contorno revela un fenómeno crucial gobernado por la

densidad, demostrando como la fracción sólida del MCF, al ser más densa que la fracción líquida, se deposita en la región inferior del volumen. Esta visualización es fundamental ya que evidencia el cambio de propiedades, como la densidad del MCF, consecuencia de la transición de fase, confirmando la evolución de transferencia de calor y la función del MCF [14]. Es decir, esta figura nos permite correlacionar la temperatura con un fenómeno espacial complejo, el cual es difícil de observar en su totalidad solo realizando mediciones puntuales. Y donde la MFC fue una herramienta fundamental la cual nos permitió cotejar la relación entre la teoría, el diseño experimental y la validación computacional del sistema de AET, teniendo una gran importancia para realizar el análisis en cada etapa del proceso.

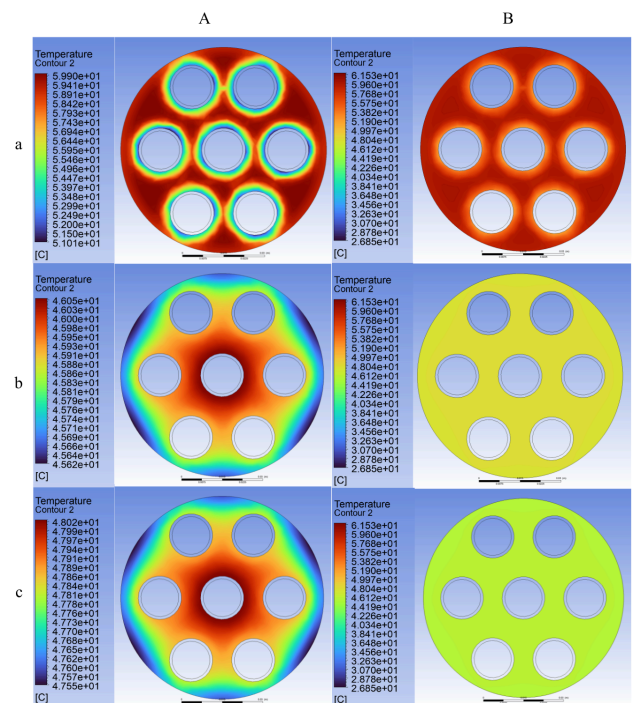


Fig. 10 Perfiles de temperaturas del agua en plano Transversal **a** tiempo 10 s, **b** tiempo 7000 s, **c** tiempo 14400 s. A representa el perfil local y **B** el Global CFD

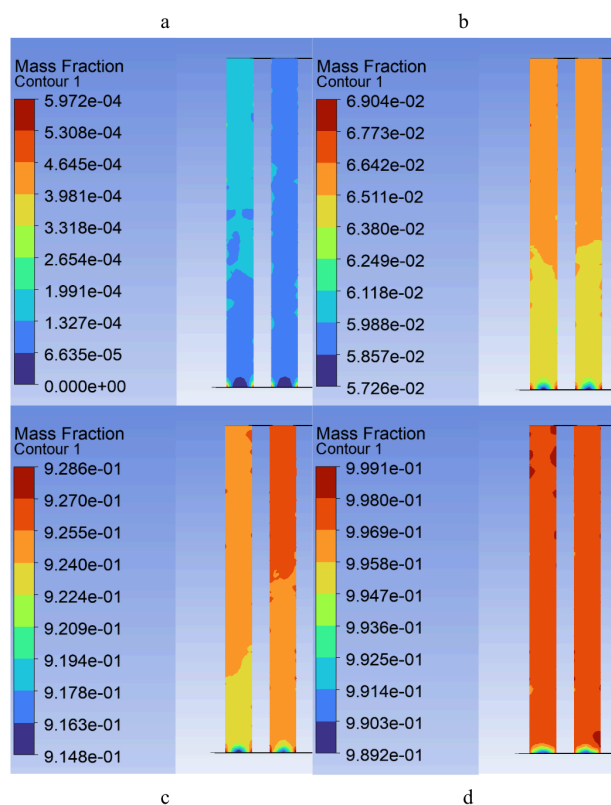


Fig. 11 Fracción másica en plano Longitudinal a tiempo 600 s, b tiempo 900s s, c tiempo 1200s d 1500 s.

IV. CONCLUSIÓN

Una vez realizado el modelado y simulado del caso experimental de la evaluación de la parafina como MCF para AET, se pueden resaltar las siguientes conclusiones fundamentales:

- El análisis computacional permitió visualizar con detalle el proceso de transferencia de calor. Los resultados obtenidos logran replicar el comportamiento térmico entre el agua, con una temperatura inicial de 60°C, y el MCF inicialmente a 25°C. Mostrando el comportamiento de los materiales consecuencia del proceso de flujo de calor, el cual generó un gradiente térmico que se atenúa progresivamente conforme el sistema avanza hacia el equilibrio térmico.
- Al lograr replicar los resultados experimentales, se valida que un modelo de MFC rigurosamente configurado, constituye una herramienta confiable y predictiva para el análisis de sistemas de AET con MCF, logrando explorar de manera eficiente y económica el comportamiento del sistema bajo a condiciones cambiantes, a su vez, ampliando el entendimiento de los fenómenos de transferencia de calor y el comportamiento que tienen los MCF de una forma más sencilla.
- Los resultados nos ayudan a visualizar la importancia de los MCF usados en sistemas de AET, ilustrando que un MCF con un punto de fusión más cercano al punto de operación del sistema, iniciara mas rapido el mecanismo de AET, lo que a su vez hará que este sistema sea más eficiente de lo que ya es.

En síntesis, este trabajo integra de manera exitosa la validación experimental con el modelado MCF, subrayando que la parafina es funcional como MCF, pero su eficacia está sujeta a una cuidadosa selección en función de las condiciones operacionales, así como una representación computacional rigurosa, donde el mallado y las condiciones de simulación son clave para obtener predicciones confiables. Además, demostrar que la simulación computacional validada se convierte en una herramienta invaluable para afinar la selección del MCF y predecir el rendimiento del sistema ante diferentes candidatos de MCF

REFERENCIAS

- [1] N. Unidas, "Naciones Unidas," 2023. [Online]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/energy/>.
- [2] IEA, "IEA," 12 Julio 2023. [Online].
- [3] PNUD, "PNUD America Latina y el Caribe," 2021. [Online]. Available: <https://www.undp.org/es/latin-america/our-focus/environment-and-energy/energy>.
- [4] J. C. P. E. Y. W. K. Du, "A state-of-the-art review of the application of phase change materials (PCM) in Mobilized-Thermal Energy Storage (M-TES) for recovering low-temperature industrial waste heat (IWH) for distributed heat supply," Science Direct, 2021.
- [5] F. P. Incropera, Fundamentals of Heat and Mass Transfer, Sixth, 2007.
- [6] Y. Cengel, Thermodynamics An Engineering Approach, 2015. .
- [7] J. Kosny, PCM-Enhanced Building Components. An Application of Phase Change Materials in Building Envelopes and Internal Structures, Switzerland: Springer International Publishing, 2015.
- [8] P. Mehta et al., "Performance assessment of thermal energy storage system for solar thermal applications," Scientific Reports, 2025.
- [9] P Jancik et al., "Experimental investigation and modelling of a laboratory-scale latent heat storage with cylindrical PCM capsules," Scientific reports, 2021.
- [10] P Jancik et al, "Constant mixing temperautre test of a fin-and-tube latent heat thermal energy storage," Scientific Reports, 2022.
- [11] Van Hap et al., "Numerical and experimental inestigation of the solar air heater with latent heat storage and fin," Scientific Reports, 2025.
- [12] G. Desa Shekata et al., "CFD simulation of a solar collector integrated with PCM thermal storage," Wiley Online Library, 2024.
- [13] A. Ghodrati et al., "Energy, exergy, exergy-economic, and environmental evaluation of an optimized hybrid photovoltaic heat pump system with solar collector and PCM," SCI where science meets business, 2024.
- [14] M. H. M. O. D. Hale, Phase Change Materials Handbook, Nasa-George C. Marshall Space Flight Center, 1971
- [15] W. Rauch, "Diseño de una Celda con Material de Cambio de Fase para un Sistema de Almacenamiento de Energía Térmica" 2021.

- [16] A. Guevara, "Propuesta de Material de Cambio de Fase Emulsionado y Estable ante Cambios de Temperatura," 2024.
- [17] A. T. Al. Mudhafar, "Enhancing PCM melting in a triple tube heat exchanger by utilizing innovative fins configurations," Springer International Publishing, 2024.
- [18] Ansys, "Ansys Help," 2024. [Online]. Available: https://ansyshelp.ansys.com/public/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v242/en/wb_msh/msh_specialized_inflation.html.