

Analysis of the Behavior of a Phase Change Material in a Refrigeration System Using CFD

Vera Simon, Ing., Asuaje Miguel, PhD
Universidad Simon Bolívar, Caracas Venezuela, 18-91094@usb.ve
Universidad Metropolitana de Caracas, Caracas Venezuela, masuaje@unimet.edu.ve

Abstract

“Today, although technical studies have successfully contributed to enhancing the energy efficiency of many industrial and residential systems, there is still much work to be done to achieve the energy transition and the Sustainable Development Goals (SDGs). Energy storage is a fundamental necessity for optimizing the use of available energy. In this context, Phase Change Materials (PCMs) stand out as a potential game-changer because they can absorb/release large amounts of energy within small temperature intervals. However, their implementation involves complex aspects of heat transfer, which are often encountered, especially during the charging and discharging processes (phase transition).

This study proposes the Computational Fluid Dynamics (CFD) simulation of the charging and discharging process of a PCM under the operating conditions of a refrigeration chamber. The chosen geometry for the case study was a flat plate, given its advantages in analysis and subsequent implementation in refrigerators. To assess the plate's performance during the charging and discharging process, working fluids (water and PCM) and operating conditions were adopted from the literature. The results obtained from the CFD analysis, for both water and PCM, exhibit good agreement in predicting the plate's charging and discharging times, with only a 1% temporal difference. Within the same time frame, the CFD simulation predicts better PCM performance compared to water, aligning with reported values. The PCM's melting process is 85% slower than that of water, leading to water quality values of 0.64 compared to 0.1 for the PCM.”

Keywords: Thermal Energy Storage (TES), Cold Thermal Energy Storage (CTES), Phase Change Material (PCM), CFD.

NOMENCLATURE

COP: Coefficient of Performance
CTES: Cold Thermal Energy Storage.
GCI: Grid Convergence Index
LH: Latent Heat.
PCCSU: Phase Change Cold Storage Unit
PCM: Phase Change Materials
SDG: Sustainable Development Goals
TES: Thermal Energy Storage.

Variables:

T [°C]: Temperature
 μ [kg/m.s]: Viscosity
k [W/mK]: Thermal conductivity
C_p [kJ/kg.K]: Specific Heat
 ρ [kg/m³]: Density

Análisis Del Comportamiento De Un Material De Cambio De Fase En Un Sistema De Refrigeración Utilizando DFC

Vera Simon, Ing., Asuaje Miguel, PhD
Universidad Simon Bolívar, Caracas Venezuela, 18-91094@usb.ve
Universidad Metropolitana de Caracas, Caracas Venezuela, masuaje@unimet.edu.ve

Abstract— *"Hoy en día, aunque los estudios técnicos han contribuido con éxito a mejorar la eficiencia energética de muchos sistemas industriales y residenciales, todavía hay mucho trabajo por hacer para lograr la transición energética y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). El almacenamiento de energía es una necesidad fundamental para optimizar el uso de la energía disponible. En este contexto, los Materiales de Cambio de Fase (MCF) destacan como un posible factor de cambio porque pueden absorber/liberar grandes cantidades de energía dentro de pequeños intervalos de temperatura. Sin embargo, su implementación implica aspectos complejos de transferencia de calor, que a menudo se encuentran, especialmente durante los procesos de carga y descarga (transición de fase).*

Este estudio propone la simulación de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) del proceso de carga y descarga de un MCF en las condiciones de operación de una cámara de refrigeración. La geometría elegida para el estudio de caso fue una placa plana, dadas sus ventajas en el análisis y la posterior implementación en refrigeradores. Para evaluar el rendimiento de la placa durante el proceso de carga y descarga, se adoptaron fluidos de trabajo (agua y MCF) y condiciones de operación de la literatura. Los resultados obtenidos del análisis CFD, tanto para agua como para MCF, muestran una buena concordancia en la predicción de los tiempos de carga y descarga de la placa, con solo una diferencia temporal del 1%. Dentro del mismo marco temporal, la simulación CFD predice un mejor rendimiento del MCF en comparación con el agua, lo que se alinea con los valores informados. El proceso de fusión del MCF es un 85% más lento que el del agua, lo que lleva a valores de calidad de agua de 0,64 en comparación con 0,1 para el MCF."

Palabras clave—Almacenamiento de energía térmica (AET), Almacenamiento de energía térmica fría (AETF), Materiales de cambio de fase (MCF), CFD.

NOMENCLATURA

COP: Coeficiente de Desempeño
AETF: Almacenamiento de Energía Térmica Fría.
GCI: Índice de Convergencia de Malla
CL: Calor Latente.
PCCSU: Phase Change Cold Storage Unit
MCF: Material de Cambio de Fase.
ODS: Objetivos de Desarrollo Sostenible
AET: Almacenamiento de Energía Térmica.

Variables:

T [°C]: Temperatura
 μ [kg/m.s]: Viscosidad
k [W/mK]: Conductividad Térmica
Cp [kJ/kg.K]: Calor Especifico
 ρ [kg/m³]: Densidad

I. INTRODUCCIÓN

Hoy en día, dependemos del suministro energético como parte fundamental de nuestro bienestar social y económico. Sin embargo, la producción de energía es el factor que más contribuye al cambio climático, representado según cifras de las naciones unidas alrededor del 60% de todas las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero [1]. En el año 2021 el consumo de electricidad alcanzó más de 5600 TWh, donde el consumo de energía de los electrodomésticos creció casi un 4%, lo que también impulsó el aumento de las emisiones [2]. Si bien las políticas energéticas han generado ganancias de eficiencia, especialmente para los principales artículos del hogar, como refrigeradores, aún queda trabajo por realizar en este sentido en pro de lograr el ODS 7.3 “duplicar la tasa mundial de mejora de la eficiencia energética” [1].

En países tropicales con temperaturas moderadas a altas las necesidades de refrigeración son fundamentales. Más aún en sitios alejados o con difícil acceso a la energía, o con generación por plantas eléctricas las cuales se accionan básicamente en horarios nocturnos, los sistemas de AETF representan una posible solución para mejorar el consumo energético y en consecuencia las emisiones. Estos sistemas funcionan almacenando la energía térmica disponible de un sistema cuando esta no es requerida, para utilizarla liberándola cuando sea necesario. Los primeros sistemas de AETF contaban con el frío de la naturaleza y el almacenamiento de frío el agua [3]. Este método utiliza el Calor Latente (CL) responsable del cambio de fase para liberar/absorber energía térmica. De aquí que se desprende la denominación de los materiales se utilizan para liberar, absorber y acumular energía cambiando de fase como: Materiales de Cambio de Fases.

Bajo el impulso de la transición energética se encuentran en estudio diferentes MCF. Su implementación presenta aún grandes interrogantes asociadas principalmente, a los fenómenos de transferencia de calor. Su diseño/uso resulta en un problema realmente desafiante debido a: la No linealidad en la transición de fase, movimiento impredecible de la interfaz sólido-líquido durante el cambio de fase, cambios de volumen impredecibles y comportamiento estructural dentro del MCF durante la transición de fase especialmente durante la solidificación, como la formación de huecos / cavidades, sobre enfriamiento, nucleación, entre otros, son situaciones reducen la tasa de transferencia de calor durante los ciclos de fusión y solidificación [4].

El primer uso documentado de un MCF fue en Massachusetts, para el caso de acumulación de energía térmica en forma de calor. La investigadora del Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT) Dra. Maria Telkes en 1948, basado en el sistema de Edward S. Morse (1881). En su casa, se usaban tambores metálicos llenos de sal de Glauber como parte de un sistema de calefacción solar pasivo [4]. El resultado del experimento fue que, durante dos inviernos y medio, la casa Dover fue calentada exclusivamente por el sol.

Aunque los sistemas AETF que han logrado implementarse con éxito, en aire acondicionado, refrigeración industrial o camiones refrigerados, la información disponible en la literatura sobre estos temas AETF es escasa.

K. Azzouz [5] realizaron pruebas experimentales para investigar el desempeño de un MCF en un refrigerador (0).

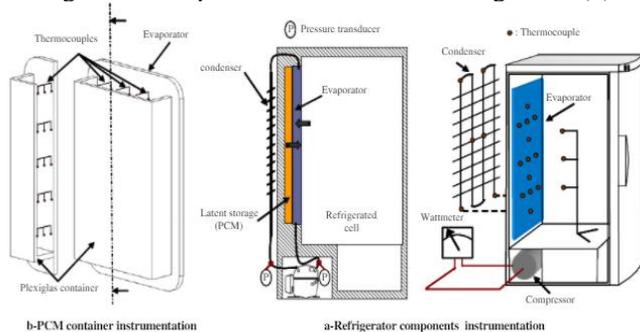


Fig. 1 Representación del caso de estudio. Fuente: Azzouz & col. (2008)

Los resultados mostraron una mejora del 10% al 30% en el coeficiente de rendimiento (COP) del ciclo de refrigeración. Por otra parte, afirmaron que la implementación del MCF en este sistema permite entre 5–9 horas de funcionamiento continuo sin suministro eléctrico (en comparación con 1–3 h sin MCF).

Benjamin G. *et al.* [6], colocaron paneles de material de cambio de fase (MCF) en las paredes internas de un congelador (0). Las comparaciones de las temperaturas del aire del congelador y de los productos alimenticios dentro del congelador, mostraron fluctuaciones de temperatura menores cuando se utilizan los paneles con MCF.

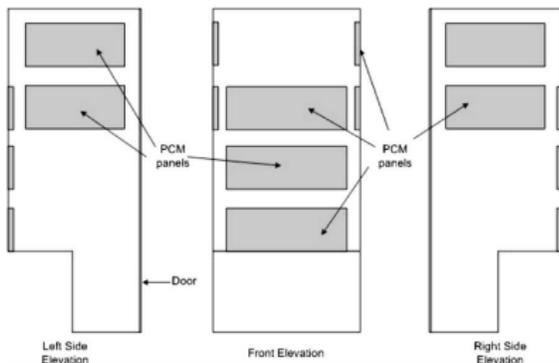


Fig. 2 Representación del caso de estudio. Fuente: Gin, B (2010)

Oró *et al.* [7], realizaron una revisión de las aplicaciones en las cuales se han implementado MCF en sistemas AETF que trabajan con temperatura de fusión inferior a 20 ° C. El documento presenta una gran cantidad MCF que están disponibles en el mercado o en investigación que funden por debajo de 20 ° C. Describen problemas asociados a su uso, como la encapsulación. Señala que el MCF a baja temperatura más estudiado es el agua por razones obvias. Plantean que los MCF más analizados por los investigadores y las empresas comerciales con una temperatura de fusión por debajo de 0 ° C son la solución salina de agua eutéctica, y por encima de 0 ° C son los MCF orgánicos.

Luego, colocaron MCF sobre los tubos del evaporador en un congelador comercial como el que se muestra en la 0.



Fig. 3 Congelador usado en el experimento

En el caso de presentarse un corte de energía eléctrica de 3 horas, el uso de MCF mantuvo la temperatura del congelador entre 4 y 6 ° C y la de los productos congelados permanecieron en niveles aceptables (2°C).

F. Alzuwaid *et al.* [8], investigaron experimentalmente y por medio de simulaciones el efecto del MCF sobre rendimiento de una vitrina refrigerada (0). Los resultados mostraron que al instalar los radiadores MCF, se lograba un 5% de ahorro de energía y temperaturas de gabinete más bajas. También se obtenía una mayor estabilización de las temperaturas del producto durante el período de descongelación.

S. Bakhshipour *et al.* [9], realizaron la simulación numérica del ciclo de refrigeración incorporado en un intercambiador de calor con MCF. Los resultados muestran que el uso de MCF disminuye la temperatura del refrigerante de salida del condensador, aumentando el COP en 9.58%.

R. Elarem *et al.* [10], realizaron una investigación experimental para mejorar la eficiencia de un refrigerador. Al integrar este intercambiador de calor, el consumo de energía se reduce en un 12% y el COP se incrementa en un 8% en comparación con el refrigerador sin MCF. Realizaron simulaciones indicando que la ubicación del de MCF tiene una influencia en la estabilización de la temperatura. Demuestran que aumentar en más de un 75 % la cobertura del MCF no genera mejoras significativas.

Omid G *et al.* [11], realizaron una investigación numérica en un sistema AETF para averiguar el volumen efectivo del MCF, demostrando que con el aumento del grosor mejora el tiempo de mantenimiento de temperatura en la cabina del congelador.



Fig. 4 Vitrina utilizada en el experimento de Alzuwaid

Raj V, [12], estudiaron el efecto del MCF en un refrigerador sometido a situaciones de aperturas frecuentes de puertas y cortes de energía eléctrica. El resultado mostró que con la implementación del MCF la temperatura se mantenía dentro del espacio frío entre 1-4 °C más baja que sin MCF. El ahorro máximo de energía observado en el caso de apertura de puertas fue de 1021,88 kJ/h cuando la puerta se abrió 3 veces durante 10 segundos con un intervalo de 20 minutos cada una y para un corte de energía eléctrica durante 1 hora el ahorro de energía fue de 3,115 kJ / h.

Du, Kun & Calautit *et al.* [13], presentaron una revisión de las aplicaciones de los materiales de cambio de fase en refrigeración, calefacción y generación de energía en diferentes rangos de temperatura. En este artículo proporcionaron una revisión del estado del arte sobre materiales de cambio de fase y sus aplicaciones para calefacción, refrigeración y generación de electricidad de acuerdo con sus rangos de temperatura de trabajo de (-20 °C a + 200 °C). El uso de MCF para el AETF en el rango de baja temperatura (-20 a 5°C), puede reducir significativamente el consumo de energía de los electrodomésticos.

Zhongbao L. *et al.* [14], estudiaron el método tradicional de conservación del hielo con la visión de reducir la cantidad de agua y mejorar la eficiencia del proceso, diseñando el sistema mostrado en la 0. El consumo de energía y el costo de la electricidad se pueden reducir en un 50,0 % y un 79,1 %, respectivamente.

Guanghai L. *et al.* [15], diseñaron e investigaron experimentalmente una unidad de almacenamiento de refrigeración de cambio de fase avanzada (PCCSU¹) para vehículos refrigerados (0). El costo de la energía se reduce en un 91,4% al usar MCF.

¹ PCCSU: En inglés: *Phase Change Cold Storage Unit*

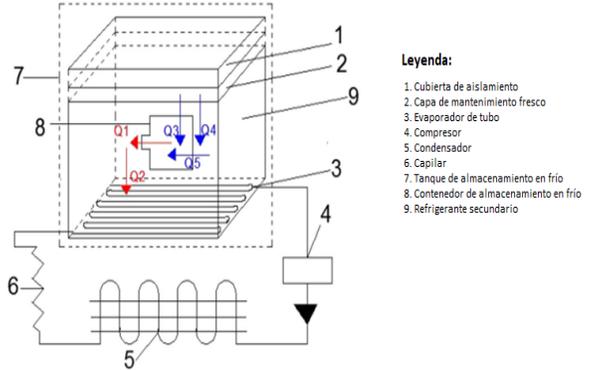


Fig. 5 Vitrina utilizada en el experimento. Fuente: Zhongbao L (2019)

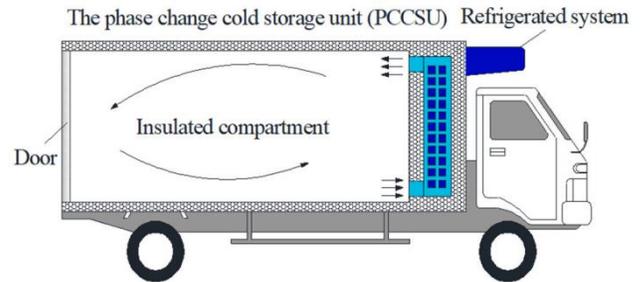


Fig. 6 Representación del vehículo propuesto.

Una alternativa ante la complejidad que implica la resolución de las ecuaciones numéricas necesarias en aplicaciones AET es emplear un software disponible comercialmente que implemente herramientas de Dinámica de Fluidos Computacional (DFC), como TRNSYS (la herramienta de simulación transitoria) o ANSYS Fluent, pues por medio de estas herramientas se puede simular los fenómenos complejos de transferencia de calor y de dinámica de fluidos que se suelen presentar en estos procesos y además, permite ajustar los parámetro correspondientes al dominio del caso de estudio con gran precisión. Lo que facilita tanto evaluar posibles nuevas implementaciones, como optimizar los sistemas AET ya existentes, esto por supuesto en la búsqueda de soluciones que nos permitan utilizar los recursos energéticos de una manera más eficiente [16]

Por lo antes expuesto, el presente trabajo plantea la simulación CFD del proceso de carga y descarga de un MCF en las condiciones de operación de una cabina frigorífica. La geometría seleccionada para el caso de estudio fue una placa plana, por las bondades que ofrece en su análisis y posterior implementación en las neveras.

II. MATERIALES Y METODOS

A. Dominio de la simulación

La geometría seleccionada para el caso de estudio fue una placa plana debido a los beneficios que ofrece en su análisis y posterior implementación en refrigeradores.

La placa tiene dimensiones de 40 cm x 40 cm en la base, con una altura de 2 cm, como se muestra en la Figura 7.

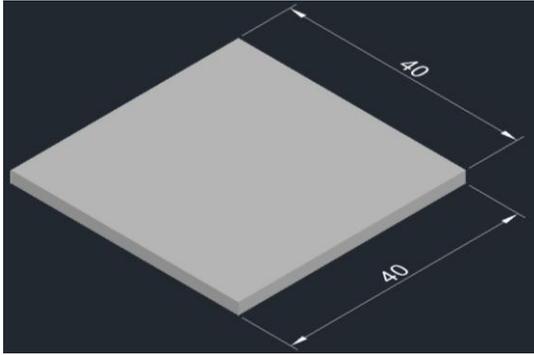


Fig. 7 Representación de la placa plana.

Las paredes de la placa son de acero galvanizado de 1,25 mm de espesor, según Vivek et al. [17]. El volumen efectivo del MCF que permite almacenar dicha configuración es de $2.8 \times 10^{-3} m^3$, aproximadamente.

B. Discretización del dominio (mallado)

La simplicidad del dominio permitió generar mallas estructuradas, como se muestra de manera representativa en la 0. Se realizó un estudio de indecencia del tamaño de la malla utilizando el índice de convergencia de malla (mejor conocido como GCI) [18]. Se crearon tres mallas diferentes (gruesa, media y fina) con un factor de refinamiento mayor al 30% entre mallas. La Tabla I muestra el número de elementos por malla.

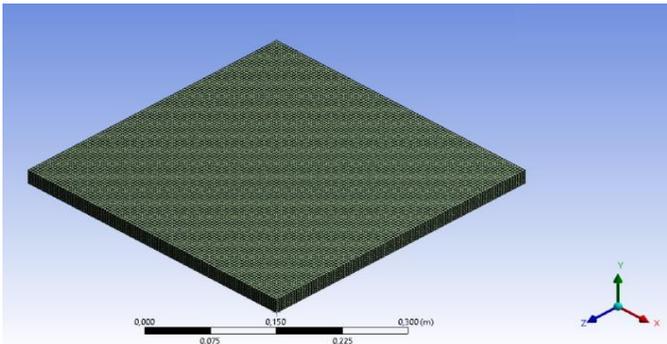


Fig. 8 Mallado de la placa plana.

TABLA I
Número de elementos del mallado

Mallas	# Nodos	# Elementos
Gruesa	51840	50410
Media	102010	100k
Fina	323208	320k

El método del Índice de Convergencia de la Malla (GCI) se implementó para evaluar la independencia de la malla [18]. En la Tabla II se puede ver que los índices de convergencia son bajos, entre la malla 2 y 3 se obtuvo un valor del 0,05%, por lo que se utilizó la malla 3 en el desarrollo de las simulaciones.

TABLA II
Análisis de la convergencia de malla

Gruesa	# Elementos	r	GCI%
Gruesa	50410	1.26	3.49
Media	100000	1.47	0.05
Fina	320000		

C. Materiales y fluidos

Las tablas III y IV resumen las propiedades de los fluidos utilizados en el desarrollo de los casos de estudio.

TABLA III
Propiedades del agua [19] [20]

T [°C]	ρ [kg/m ³]	μ [kg/m.seg]	k [W/mK]	Cp [kJ/kg.K]
-20,2	920,00	-	2,03	1,943
-0,15	920,00	-	1,88	2,04
0	999,81	0,00177	0,569	4,217
1	999,88	0,00176	-	4,213
2	999,94	0,00175	0,574	4,211
3	999,98	0,00174	-	4,207
4	1.000,00	0,00173	-	4,205
5	999,98	0,00172	0,571	4,202
6	999,94	0,00171	-	4200

TABLA IV
Propiedades del tetradecano (MCF). [21] [22]

T [°C]	ρ [kg/m ³]	k [W/mK]	Cp [KJ/kg.K]
-14,33	842,25		
-8,68	827,19		
1,68	816,14		
3,25	813,42		
3,57	824,15		
4,59			2,057
5,00			2,061
5,50	765,78	0,129	2,031
6,00		0,21	2,069
6,08	773,53		
7,00			2,078
10,00			
10,47	770,97		
40,00		0,1325	

El movimiento del MDF en estado líquido es incompresible, no newtoniano y turbulento. La densidad,

viscosidad y conductividad térmica del MCF varían linealmente. La viscosidad del tetradecano se mantuvo constante con un valor de 0,002875 [kg/m.seg]. En todos los casos, la conductividad térmica del acero es $k = 16 \text{ W/m}^\circ\text{C}$.

D. Parámetros de la simulación y condiciones de borde.

La 0V resume los parámetros numéricos generales considerados para realizar las simulaciones tanto con agua como MCF. Para los materiales de cambio de fase, se simuló el proceso de carga y descarga para dos casos o condiciones. En el caso 1, las temperaturas iniciales del MCF y el aire externo se establecen como condiciones de borde, que permanecen constantes. En el caso 2, se ha establecido el coeficiente global de transferencia de calor entre la placa y el entorno según las condiciones de funcionamiento interno del refrigerador propuestas por Vivek 2018 (Tabla VI).

TABLA V
Resumen de las condiciones de la simulación.

Parámetro	Detalle
Fluido	Agua / Tetradecano.
Modelo Viscoso	Laminar
Flotabilidad	Modelo de flotabilidad activado
Condiciones	Transitorio
Esquema de advección	2do Orden
Criterio de parada	Para masa y momento: $RMS < 1 \times 10^{-4}$ & desequilibrios $< 2\%$.
Tiempo de carga y descarga	Variable

El procedimiento de cálculo del coeficiente global de transferencia de calor se ha estimado según lo informado en Vera (2024). Los valores para cada cara que se muestra en la figura 9, también se han informado en la tabla VI.

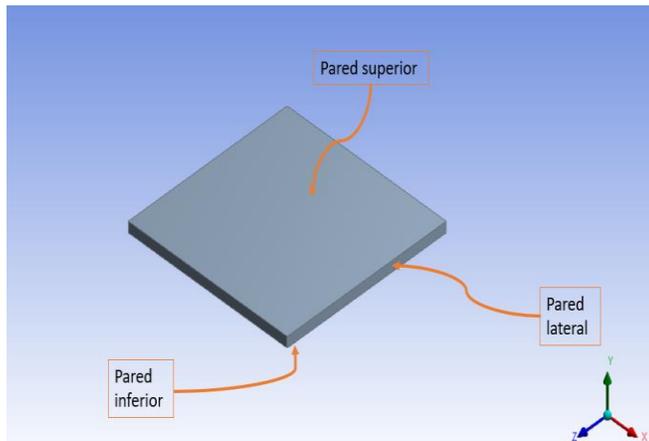


Fig. 9 Representación de las caras de la placa plana.

TABLA VI
Condiciones de borde de los casos de estudio

Caso	Proceso	Temperatura MCF	Temperatura externa	Coef Tranf. [W/m ² K]
I	Carga	10°C	-10°C	N/A
	Descarga	-25 °C	10°C	N/A
II	Carga	10°C	- 10°C	P.S:11.48
				P.I: 10.75
				P.L: 5.45
	Descarga	-25 °C	10°C	P.S: 11.48
			P.I: 10.75	
			P.L: 5.45	

III. RESULTADO Y DISCUSIÓN

Tras realizar el análisis numérico del proceso de carga y descarga para los dos materiales en los casos planteados contenidos en la placa rectangular de 40cmx40cmx2cm los resultados fueron evaluados en intervalos de tiempo variables, pues en cada caso el comportamiento de los materiales presentó particularidades que resultaros relevante de resaltar.

A. Caso 1:

En la figura 10 y 11 se presenta el comportamiento promedio de la temperatura del MCF (agua y tetradecano) durante el proceso de carga y descarga respectivamente. Donde el primer aspecto a resaltar es el intervalo de tiempo, para las condiciones del caso el intervalo de tiempo tiene una diferencia porcentual de aproximadamente 79% y de 77% en la carga y la descarga respectivamente. Lo cual evidencia la ventaja de implementar MCF cuyo punto de fusión este entre las condiciones de operación y no cerca de los extremos de las mismas, pues implicaría una contribución reducida por parte del material al sistema que se esté evaluando.

En lo que respecta a la fracción de líquido en las figuras 12 y 13 donde se muestran el comportamiento de la misma de ambos materiales, donde además de la diferencia temporal, previamente planteada, también notamos una diferencia significativa de 10% y 20% en los valores finales de las fracciones de líquido de los materiales durante la descarga y la carga respectivamente, lo cual implica una ventaja pues mientras mayor sea dicha fracción mayor es la cantidad de energía almacenada en forma de LH, que podría ser empleada posteriormente al requerirlo el sistema en el cual se implemente.

Adicionalmente, al comparar estos resultados con lo reportado por Vivek (2018) [12] en la figura 12 se evidencia que el intervalo en el que ocurre la transición de fase para el agua es similar al reportado por ellos, aunque en su caso solo señala el fluido de trabajo y la temperatura de inicio del proceso de descarga. Por otra parte, el intervalo en que ocurren tanto el proceso de carga como descarga está dentro del intervalo de tiempo de operación de un refrigerador según los intervalos mostrados en los trabajos tanto Vivek (2018) como Azzouz (2008) [12] [5].

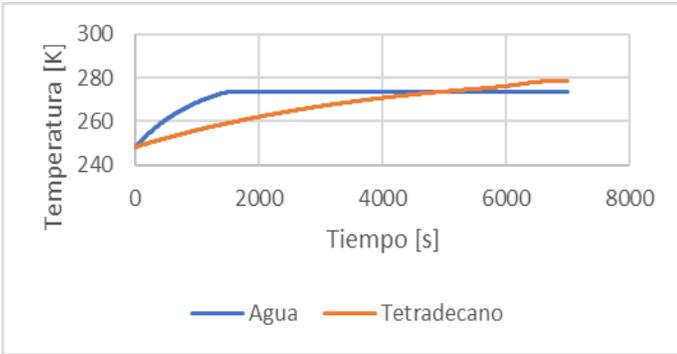


Fig. 10 Temperatura promedio del MCF durante el proceso de descarga del caso 1.

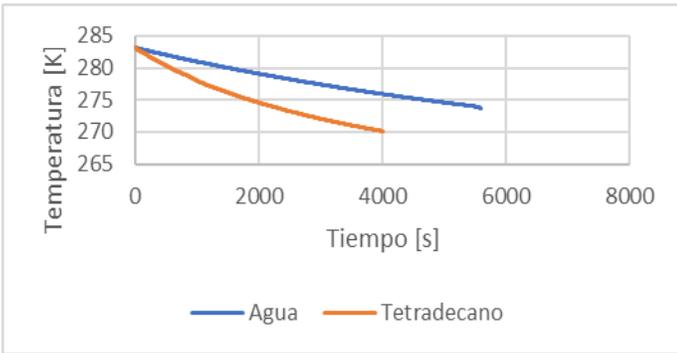


Fig. 11 Temperatura promedio del MCF durante el proceso de carga del caso 1.

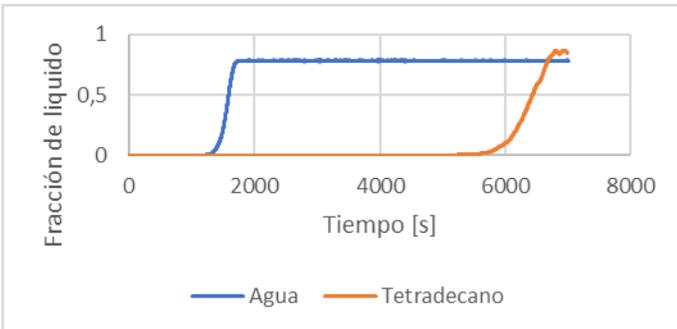


Fig. 12 Fracción de líquido promedio del MCF durante el proceso de descarga del caso 1.

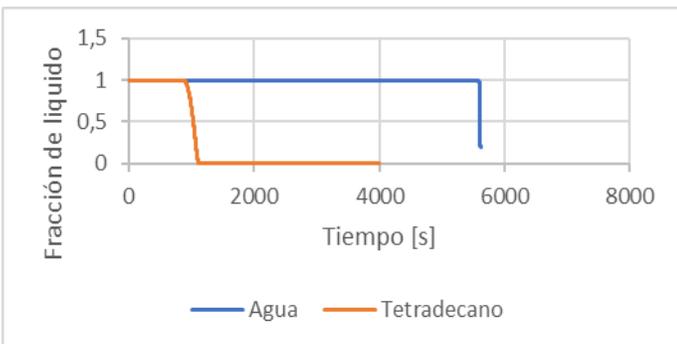


Fig. 13 Fracción de líquido promedio de MCF durante el proceso de carga del caso 1.

B. Caso 2

En la figura 14 y 15 se presenta el comportamiento promedio de la temperatura del MCF (agua y tetradecano) durante el proceso de carga y descarga respectivamente. Donde el primer aspecto a resaltar es el intervalo de tiempo, para las condiciones del caso el intervalo de tiempo tiene una diferencia porcentual del 89% y de 62% en la carga y la descarga respectivamente.

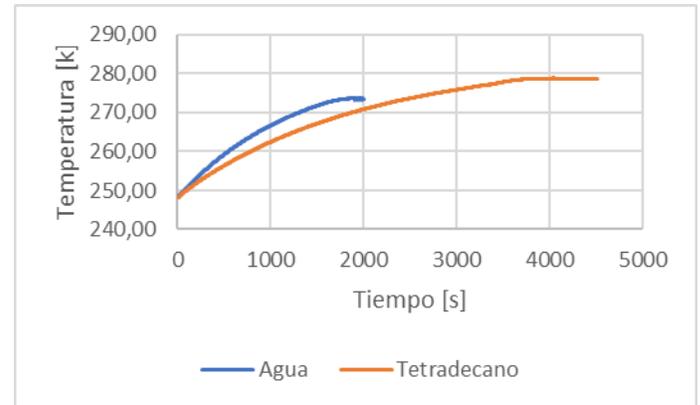


Fig. 14 Temperatura promedio del MCF durante el proceso de descarga del caso 2

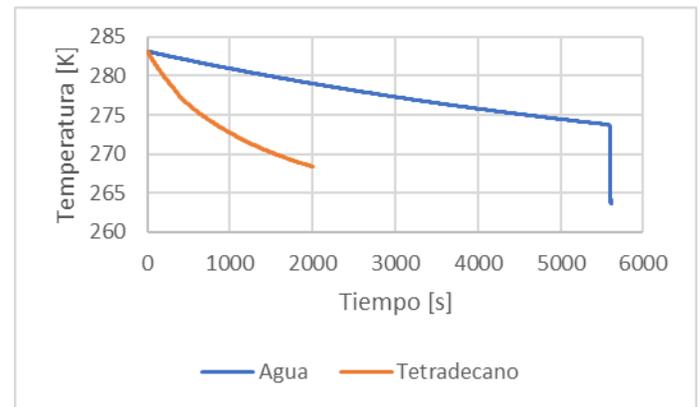


Fig. 15 Fracción de líquido promedio de MCF durante el proceso de carga del caso 2.

En las figuras 16, 17, 18 y 19 se muestran los contornos de temperatura y fracción de líquido en un plano ubicado en el centro de la placa, en diferentes instantes de los procesos de carga y descarga de cada material. Donde se muestran aspectos y diferencias relevantes que se presentaron en cada uno de los procesos como:

- Las figuras 16 y 18 presentan los contornos durante el proceso de descarga del agua y del tetradecano respectivamente, donde se puede evidenciar la diferencia en la que se inicia la transición de fase, pues para el caso del agua esta inicia alrededor de 1300 seg mientras que para el tetradecano este inicia aproximadamente a los 2600 seg. Sin embargo, al

visualizar las fracciones de líquido promedio al final del proceso para los dos fluidos, la del tetradecano es aproximadamente 15% mayor que la del agua.

- Las figuras 17 y 19 presentan los contornos durante el proceso de carga del agua y del tetradecano respectivamente, donde se puede evidenciar para este caso las diferencias más significativas en la que se inicia la transición de fase, pues para el caso del agua esta inicia alrededor de 5000 seg mientras que para el tetradecano este inicia aproximadamente a los 500 seg. Esto al contrario del proceso de descarga el cual inicio (en comparación) más cercano al punto de fusión del agua. Por otra parte, al visualizar las fracciones de líquido promedio al final del proceso para los dos fluidos, la del tetradecano completa el proceso de fusión mientras que en promedio al agua le falta aproximadamente un 20% para completar el proceso de fusión.

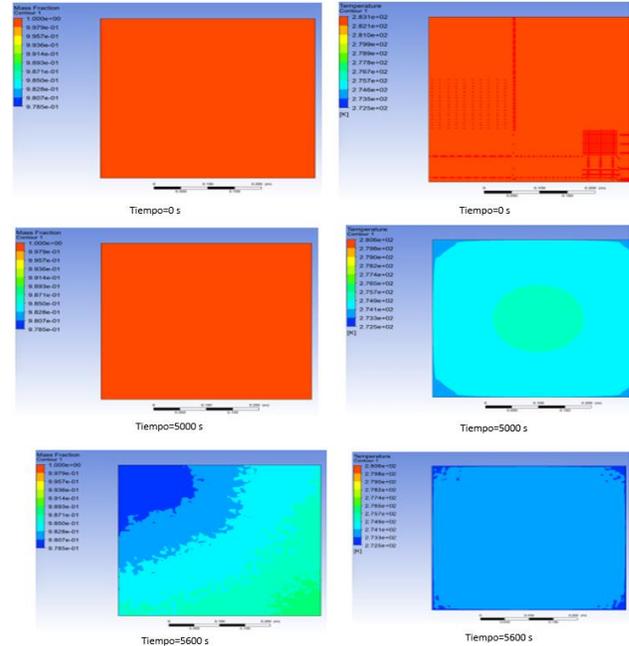


Fig. 17 Carga del agua

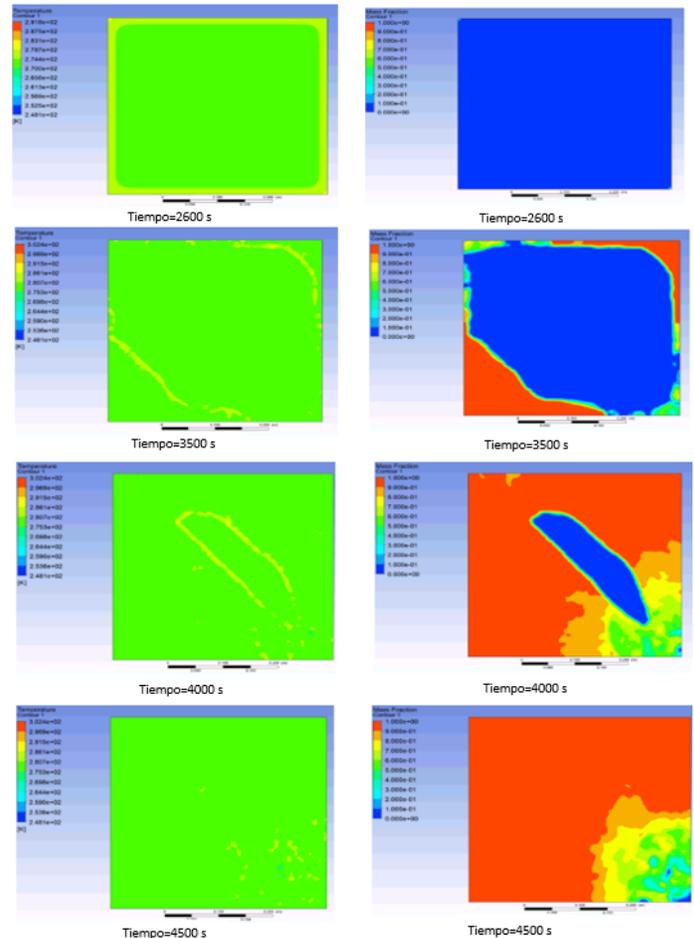


Fig. 18 Descarga del tetradecano.

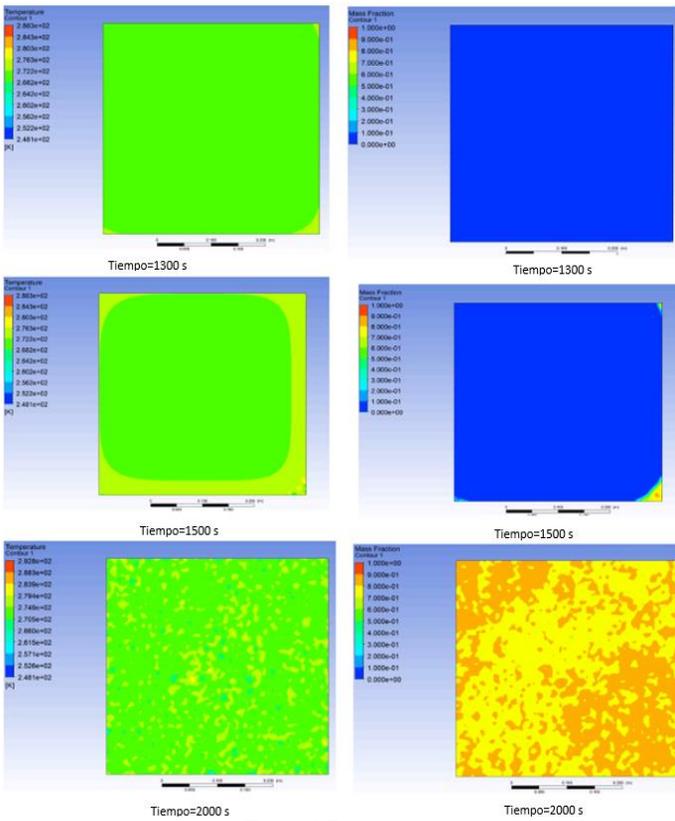


Fig. 16 Descarga agua.

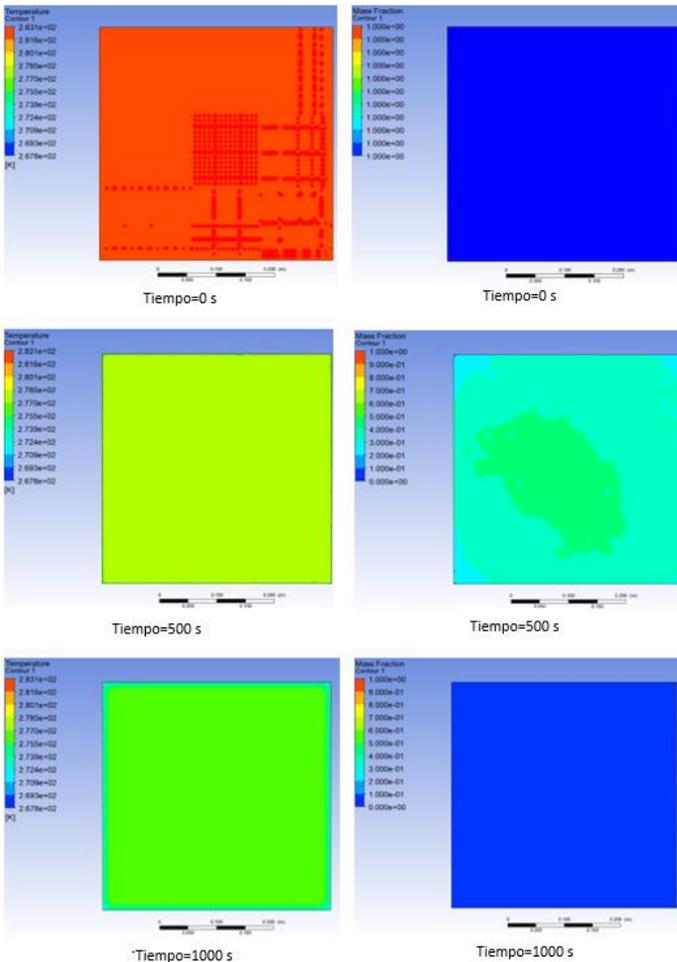


Fig. 19 Carga del tetradecano.

IV. CONCLUSION

Tras la realización del modelado y simulación de los casos expuestos donde se implementaron dos MCF para diferentes condiciones de operación podemos resaltar:

- La correcta selección del MCF en función de las condiciones de operación del caso de estudio, son un factor determinante en la eficiencia que tendrá el mismo.
- Pequeñas modificaciones u omisiones en las condiciones de operación pueden implicar diferencias significativas en los resultados obtenidos al realizar simulaciones de los modelos experimentales.
- La adecuada discretización del dominio y selección del paso temporal es un factor determinante para evitar divergencias en el desarrollo de las simulaciones.

Tras todo lo previamente expuesto se puede concluir que ANSYS (Fluent) representa una alternativa eficiente y viable

para la simulación de los sistemas de AETF con MCF siempre que se tengan en consideración los apropiadas condiciones y parámetros de operación de los mismos.

RECONOCIMIENTO

Extendemos nuestro sincero agradecimiento a **ESSS** por su colaboración y por concedernos acceso a sus licencias de software ANSYS. Su apoyo enriqueció significativamente nuestra investigación

REFERENCIAS

- [1] Naciones Unidas, «Naciones Unidas,» 3 Diciembre 2020. [En línea]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/energy/>.
- [2] IEA, «IEA,» 03 Diciembre 2020. [En línea]. Available: <https://www.iea.org/reports/appliances-and-equipment>.
- [3] J. S. A. B. Lindsay, «Evolution of Thermal Energy Storage for Cooling Applications,» *ASHRAE Journal*, pp. 42-59, 2019.
- [4] J. Košný, *PCM-Enhanced Building Components. An Application of Phase Change Materials in Building Envelopes and Internal Structures*, Switzerland: Springer International Publishing, 2015.
- [5] K. Azzouz, «Performance enhancement of a household refrigerator by addition of latent heat storage,» *International Journal of Refrigeration*, pp. 892-901, 2008.
- [6] M. M. F. B. Gin, «The use of PCM panels to improve storage condition of frozen food,» *Journal of Food Engineering*, pp. 372-376, <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.04.016>, Volume 100, Issue 2, 2010.
- [7] E. C. A. C. L. F. F. M. Oró, «Review on phase change materials (PCMs) for cold thermal energy storage applications,» *Applied Energy*, pp. 513-533, 2012.
- [8] Y. T. G. S. T. A. R. L. G. F. Alzuwaid, «The novel use of phase change materials in a refrigerated display cabinet: An experimental investigation,» *Applied Thermal Engineering*, pp. 770-778, 2015.
- [9] M. V. Y. P. S. Bakhshpour, «Parametric analysis of domestic refrigerators using PCM heat exchanger,» *International Journal of Refrigeration*, pp. Volume 83, 1-13 <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2017.07.014>, 2017.
- [10] S. M. E. A. A. J. R. Elarem, «Performance analysis of a household refrigerator integrating a PCM heat exchanger,» *Applied Thermal Engineering*, pp. Volume 125, 1320-1333, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.07.113>, 2017.
- [11] R. A. Omid G. Z., «Employment of finned PCM container in a household refrigerator as a cold thermal energy storage system,» *Thermal Science and Engineering Progress*, pp. Volume 7, 115-124, <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2018.06.002>, 2018.

- [12] G. T. Vivek Raj, «Use of phase change material (PCM) for the improvement of thermal performance of cold storage,» *MOJ Curr Res & Rev.*, 2018.
- [13] K. & C. J. & W. Z. & W. Y. & L. H. Du, «A review of the applications of phase change materials in cooling, heating and power generation in different temperature ranges,» *Applied Energy, Elsevier*, , pp. vol. 220(C), pages 242-27, 2018.
- [14] F. L. X. Q. Y. B. Z. Y. S. Zhongbao L., «Performance evaluation of a new ice preservation system for supermarkets,» *International Journal of Energy Research* , p. 10.1002/er.4805, 2019.
- [15] Q. L. J. W. R. X. Y. Z. A. M. A. S. A. M. Guanghai Liu, «Improving system performance of the refrigeration unit using phase change material (PCM) for transport refrigerated vehicles: An experimental investigation in South China,» *Journal of Energy Storage*, pp. Volume 51, <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104435>, 2022.
- [16] I. Dincer, *Thermal Energy Storage System and Applications*, UK: John Wiley, 2011.
- [17] G. T. Raj V, «Use of phase change material (PCM) for the improvement of thermal performance of cold storage,» *MOJ Curr Res & Rev.* 2018;1(2):49-61. DOI: 10.15406/mojcrr.2018.01.00010, pp. 49-61. DOI: 10.15406/mojcrr.2018.01.00010, 2018.
- [18] M. M.-H. C. & M. T. Chaker, «Inlet Fogging of Gas Turbine Engines: Part B — Fog Droplet Sizing Analysis, Nozzle Types, Measurement and Testing.,» *ASME Turbo Expo 2002: Power for Land, Sea, and Air*, 2002.
- [19] F. P. Incropera, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, Sixth, 2007.
- [20] Y. Cengel, *Thermodynamics An Engineering Approach*, 2015.
- [21] W. R. Humphries, *A Desing Handbook for Phase Change Thermal Control and Energy Storage Devices*, 1977.
- [22] X. a. S. Q. a. L. L. a. F. Y. a. W. Q. a. J. G. Zhang, «Research Progress on the Phase Change Materials for Cold Thermal Energy Storage,» *Energies*, vol. 14, n° 8233, 2021.
- [23] V. A. N. S. M. & S. P. Kulish, «New library of phase-change materials with their selection by the Rényi entropy method,» *Scientific reports*, 2023.
- [24] P. M. A. BRUCE B. LINDSAY y J. S. ANDREPONT, «Evolution of Thermal,» *ASHRAE*, p. 12, 2019.

[1]