

## ANÁLISIS PARAMÉTRICO DE UN TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA CON CAMBIO DE FASE

Ylka J. Morales-Aller, Jesús Cerezo

Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Av. Universidad 1001, Cuernavaca 62209, Morelos, Mexico, 777 3297084, [ylka.morales@uaem.edu.mx](mailto:ylka.morales@uaem.edu.mx).

### RESUMEN

En busca de nuevas alternativas en donde los impactos negativos al ambiente sean menores, para las actividades cotidianas de la humanidad; se han desarrollado dispositivos que utilicen fuentes de energía renovables como la solar. Una de estas actividades, que el ser humano realiza como parte de su existencia, es la cocción de los alimentos. Ante esta situación, se han desarrollado dispositivos que aprovechan la energía solar para cocinar alimentos. Sin embargo, aún hay áreas por mejorar, como el almacenamiento de energía. Se ha propuesto la utilización de los materiales de cambio de fase, ya que almacenan mayor cantidad de energía por el calor latente, pues a cierta temperatura el material cambiará su estado de la materia, liberando energía calorífica al ambiente, para volverse a solidificar.

En este trabajo se presenta el diseño de un tanque de almacenamiento de energía con cambio de fase de tubos concéntricos, en donde el material de cambio de fase estará en el anulo y el fluido térmico en el centro del tubo. Se presenta un modelo matemático, donde se establecen las ecuaciones de transferencia de calor para el estudio de la difusividad térmica. El método de diferencias finitas será utilizado para la resolución de las ecuaciones en condiciones transitorias en el software *Equation Engineering Solver (EES)*. Al realizar un análisis paramétrico del tanque, se observó que, en menos de 30 minutos, se alcanza la temperatura de fusión, y aumentar el largo del tanque y el diámetro de paso del fluido de calentamiento mejora la transferencia de energía.

### ABSTRACT

Searching for better alternatives where the negative impacts to the environment are less, for the daily activities of humanity; devices that use renewable energy sources such as solar, have been developed. One of these activities, which humans carry out as part of their existence, is cooking food. Faced with this situation, devices have been developed that take advantage of solar energy to cook food. However, there are still areas for improvement, such as energy storage. The use of phase change materials has been proposed, because they can store a greater amount of energy due to latent heat, since at a certain temperature the material will change its state of matter, releasing heat energy into the environment, to re-solidify.

In this paper the design of an energy storage tank with concentric tube phase change is presented, where the phase change material will be in the annulus and the thermal fluid in the center of the tube. A mathematical model is presented, where the heat transfer equations are established for the study of thermal diffusivity. The finite difference method will be used to solve the equations under transient conditions in the Equation Engineering Solver (EES) software. When performing a parametric analysis of the tank, it was observed that in less than 30 minutes, the melting temperature is reached, and increasing the length of the tank and the passage diameter of the heating fluid improves energy transfer.

Palabras claves: energía, tubos concéntricos, cambio de fase, diferencias finitas, Eritritol.

### INTRODUCCIÓN

La energía proveniente del sol, es una fuente disponible en todo el año que cualquier persona tiene acceso a ella. En busca de fuentes sustentables para cubrir los requerimientos energéticos en las actividades diarias humanas, como la cocción de los alimentos, se han creado dispositivos que aprovechan la irradiancia solar para convertirla en energía calorífica. Los ejemplos más comunes de estas alternativas en México son: los hornos solares y los comales solares Tolokatsin, donde su principio se basa en la óptica anidólica (González et al, 2013). Si bien la energía solar se encuentra disponible las 24 horas del día (Nandwani, 2005), este tipo de dispositivos son eficientes durante el día, cuando los rayos del sol impactan directamente la superficie terrestre.

A pesar de que los dispositivos ya existentes han logrado cocinar alimentos, aún hay áreas de oportunidad como: evitar la exposición del usuario a los rayos solares; disminuir las fugas luminosas y destellos dañinos para la vista; mejoramiento en el almacenamiento y la cantidad de energía disponible almacenada; la regulación de la energía calorífica proveída a los alimentos; y la rentabilidad económica para los hogares con escasos recursos. Es por ello, que se necesita desarrollar proyectos en los que las desventajas sean menores y así, lograr una mayor eficiencia, de manera que en cada hogar la primera opción sean los equipos abastecidos por energía limpia.

Una de las alternativas estudiadas, son los sistemas de almacenamiento de energía, utilizando materiales de cambio de fase (MCF). Estos materiales se clasifican en tres tipos; orgánicos, inorgánicos y eutécticos (Kalidasan, *et al*, 2020). Las parafinas, ácidos grasos, ésteres y alcoholes, se encuentran dentro del grupo de los orgánicos; las sales, sales hidratadas, compuestos metálicos y aleaciones metálicas, son parte de los inorgánicos; los eutécticos son una mezcla de compuestos, esta puede ser orgánico-orgánico, orgánico-inorgánico o inorgánico-inorgánico (Cárdenas, 2013).

En el desarrollo de estudios de fenómenos de transferencia de energía, se realizan modelos matemáticos para poder analizarlos de manera detallada. Para resolver estos, se han desarrollado métodos numéricos, que se componen por ecuaciones algebraicas para las temperaturas (en este caso) en ciertos puntos del objeto de estudio (Çengel, 2007).

Para este estudio, se decidió crear un modelo matemático, de un tanque de almacenamiento de energía con cambio de fase, para analizar el comportamiento de la transferencia de calor en dos dimensiones y en estado transitorio.

El objetivo de este trabajo es analizar el comportamiento de un intercambiador de calor de tubos concéntricos para almacenar energía con cambio de fase, para esto se desarrollará un modelo matemático en el que se establezcan las ecuaciones de transferencia de calor en estado transitorio y dos dimensiones; y resolverlo por el método de diferencias finitas. Esto, con el fin de encontrar las mejoras a realizar en este tipo de tanques, sin invertir tiempo y dinero que podría gastarse en la creación de los dispositivos.

## METODOLOGÍA

El sistema, trata de un tanque de tubo y coraza cilíndricos. En el tanque, se encuentra un material de cambio de fase (MCF), que permitirá almacenar energía al alcanzar su temperatura de fusión; calentándose con un fluido que entra por el lado izquierdo, pasando entre el MCF. Estos materiales se encuentran divididos por una placa, de espesor despreciable.

En la figura 1 se muestra el diagrama del tanque, las dimensiones propuestas y la disposición del fluido de calentamiento y el material de cambio de fase.

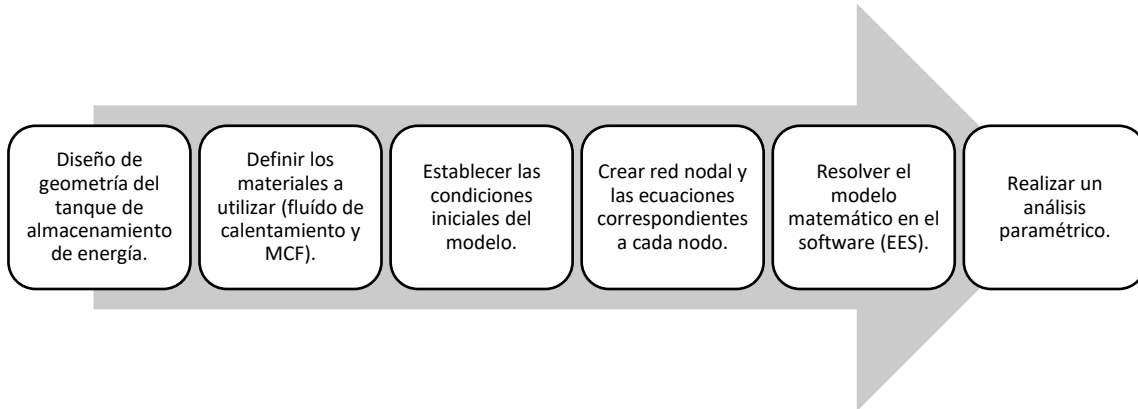


*Figura 1. Diseño del tanque de almacenamiento con dimensiones.*

Para este modelo, se tienen algunas suposiciones:

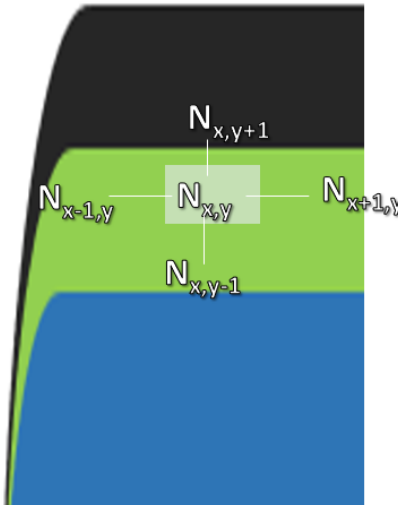
- El sistema se encuentra expuesto a una temperatura ambiental de 25 °C.
- El fluido de calentamiento es Agua, con una temperatura de entrada de 150 °C.
- El material de cambio de fase es Eritritol, que se encuentra a 90 °C.
- El material aislante es fibra de vidrio, que se encuentra a una temperatura de 30 °C.
- El flujo másico del agua es de 0.5 kg/s.

El modelado matemático se resolvió realizando una serie de pasos, que en la figura 2 se muestran:



*Figura 2. Diagrama de la secuencia de pasos llevados a cabo en este estudio.*

El modelo matemático se realizó por medio del método de diferencias finitas, en condiciones transitorias, en dos dimensiones. La figura 3 y la ecuación 1, son un ejemplo de la formulación utilizada para el código de este estudio.



*Figura 3. Diagrama ejemplo del volumen de control para el nodo  $N(x,y)$ .*

Para este ejemplo, las ecuaciones del balance de transferencia de energía en el nodo  $N_{x,y}$ , quedarían:

$$(1) \quad \frac{k_{MCF} AT_{N_{x,y}} (T_{N_{x-1,y}}^{i+1} - T_{N_{x,y}}^{i+1})}{dx} + \frac{k_a 2 \pi dx (T_{N_{x,y+1}}^{i+1} - T_{N_{x,y}}^{i+1})}{\ln \frac{r_{N_{x,y+1}}}{r_{N_{x,y}}}} + \frac{k_{MCF} AT_{N_{x,y}} (T_{N_{x+1,y}}^{i+1} - T_{N_{x,y}}^{i+1})}{dx} + h_{FC} AC_{N_{x,y}} (T_{N_{x,y-1}}^{i+1} - T_{N_{x,y}}^{i+1}) = \frac{\rho_{MCF} Cp_{MCF} \Delta V (T_{N_{x,y}}^{i+1} - T_{N_{x,y}}^i)}{dt}$$

Donde:  $x$  y  $y$  hacen referencia a los ejes de las direcciones en dos dimensiones;  $i$  e  $i+1$  establecen el tiempo que pasa;  $MCF$ ,  $FC$  y  $a$  son el material de cambio de fase, el fluido de calentamiento y el aislante;  $k$ , es la conductividad térmica;  $T$  son las temperaturas respectivas a cada nodo;  $AT$  es el área transversal;  $AC$  es el área cilíndrica;  $dx$  es el largo;  $r$  es el radio;  $Cp$  es la capacidad calorífica específica;  $dt$  es el paso de tiempo;  $h$  es la constante de convección; y  $\rho$  es la densidad. Cabe aclarar que cada dato es correspondiente a las características de cada nodo.

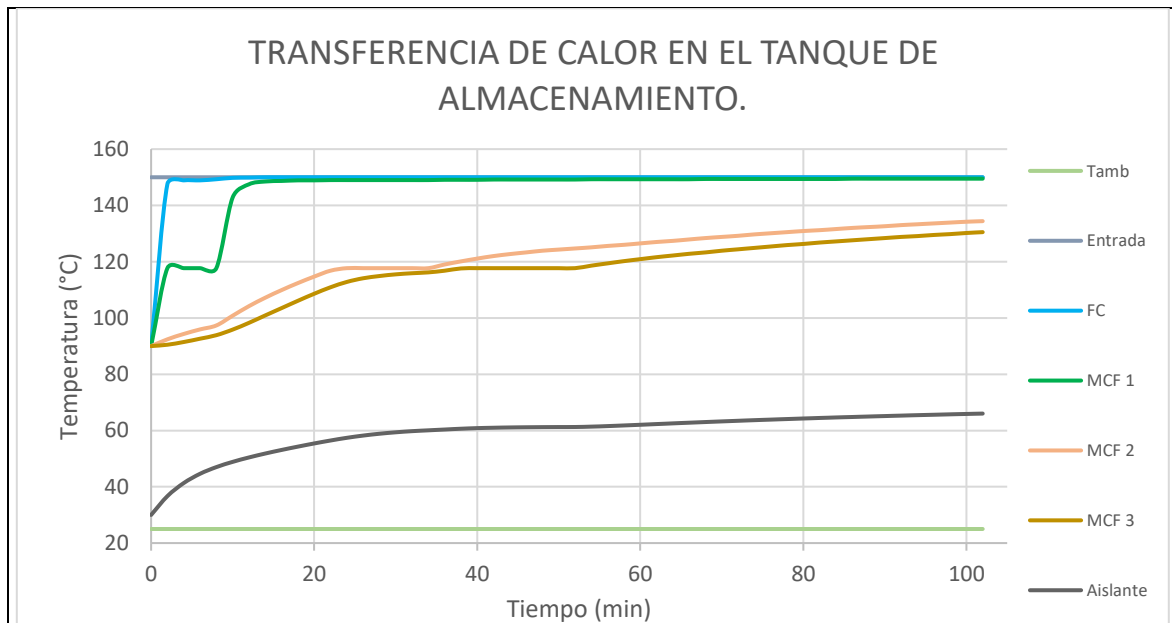
Por último, para crear el código del modelo matemático y poder evaluarlo en el software EES, se obtienen las propiedades térmicas y físicas de los materiales, que a continuación se presentan:

*Tabla 1. Propiedades térmicas y físicas del Agua y el Eritritol (Agyenim et al., 2010 y EES, 2021).*

PROPIEDAD	AGUA	ERITRITOL	
		Sólido	Líquido
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	916.6	1480	1300
Calor específico (J/kg K)	4311	2250	2610
Conductividad térmica (W/m K)	0.682	0.733	0.326
Viscosidad dinámica (kg/m s)	0.183e-3	-----	
Número de Prandtl	1.16		
Temperatura de fusión (°C)	---	117.7	
Calor de fusión (kJ/kg)	---	339.8	

## RESULTADOS

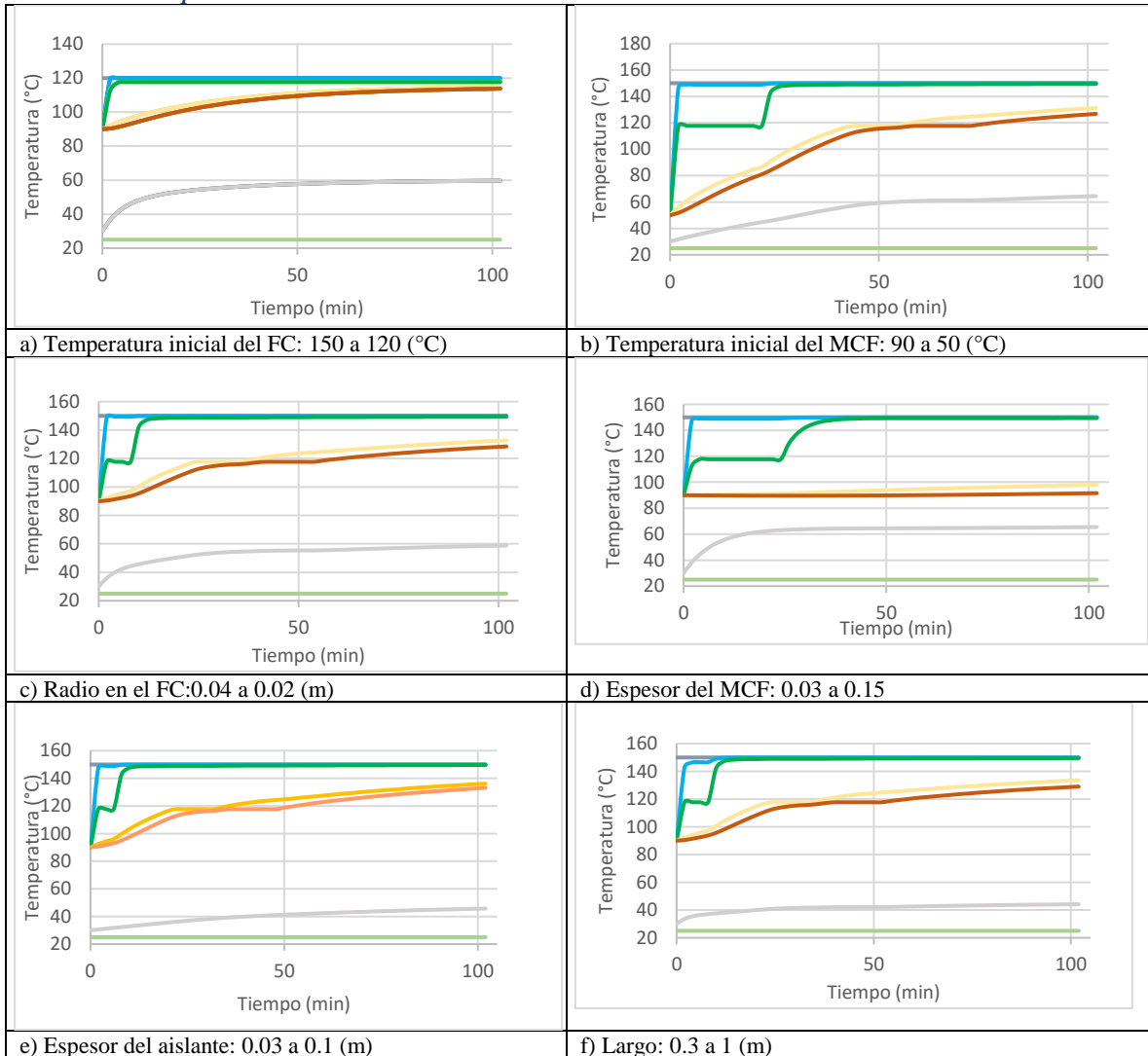
Con los datos de entrada se realizó un caso base y un análisis paramétrico, el caso base se muestra en la figura 4. De acuerdo con los resultados, se observa que la temperatura del tanque tiende a aumentar. Aproximadamente a los 30 minutos, el MCF alcanza la temperatura de cambio fase.



*Figura 4. Comportamiento de las temperaturas en las secciones lejanas a la de entrada, en un periodo menor a dos horas.*

De acuerdo con las variaciones para realizar el análisis paramétrico, el disminuir la temperatura inicial de los materiales, impacta directamente en el tiempo. Sin embargo, la tendencia sigue siendo que la temperatura aumente, pues de 90 °C pasa a 149 °C y más de 130 °C para el FC y MCF, respectivamente. El modificar las dimensiones del tanque también tiene un impacto notorio: al tener un mayor diámetro de paso para FC y el largo del tanque, mejora la transferencia de calor, mientras que un aumento en el espesor del MCF, la disminuye. También se evaluó si el tener un mayor espesor de aislante disminuiría la pérdida de energía, lo que resultó conveniente, ya que la temperatura del MCF es mayor a comparación del caso base y la del aislante, menor. Las figuras resultantes del análisis paramétrico, se muestran en la tabla 2.

**Tabla 2. Análisis paramétrico.**



## CONCLUSIÓN

De acuerdo con los resultados obtenidos, se observó que el comportamiento del modelo matemático del tanque de almacenamiento de energía con cambio de fase, es coherente, ya que al permanecer constante la temperatura de entrada del FC, se mantiene aumentando la temperatura para el MCF.

El modelo matemático y los resultados obtenidos en el software EES, confirman que este software permitió obtener la información necesaria para este estudio. Con ello, se pudo observar que al utilizar un fluido de calentamiento con propiedades similares a las del agua, teniendo como temperatura inicial una superior a la de fusión del MCF, este cambiará su fase, liberando energía disponible para utilizar en el proyecto correspondiente, que, en este caso, tiene pensado ser un tanque de almacenamiento de energía para disponer en la cocción de alimentos.

Al realizar el análisis paramétrico, se puede concluir que, para mejorar el diseño del tanque, habría que aumentar el largo del tanque, el diámetro de paso del FC y el espesor del aislante.



## REFERENCIAS

- Agyenim, F., Hewitt, N., Eames, P., & Smyth, M. (2010). A review of materials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (LHTESS). *Renewable and sustainable energy reviews*, 14(2), 615-628.
- Cárdenas, B., & León, N. (2013). High temperature latent heat thermal energy storage: Phase change materials, design considerations and performance enhancement techniques. *Renewable and sustainable energy reviews*, 27, 724-737.
- Çengel, Y. A. *Transferencia de calor y masa*. Tercera edición. McGraw-Hill/Interamericana Editores, México D.F, Cop. 2007.
- Engineering Equation Solver (EES). (2021, julio 15). Base de datos . Transient System Simulation
- González, M., López, L., Servín, H., & González, D. (2013), Desarrollo, Implementación Y Apropiación De Cocinas Solares Para El Medio Rural En Michoacán: Una Alternativa Energética Para La Conservación De Recursos Forestales Maderables. junio 08, 2020, de Energías Renovables de la Asociación Nacional de Energía Solar (ANES), Forthcoming, disponible en: <https://ssrn.com/abstract=2362687>
- Kalidasan, B., Pandey, A. K., Shahabuddin, S., Samykano, M., Thirugnanasambandam, M., & Saidur, R. (2020). Phase change materials integrated solar thermal energy systems: Global trends and current practices in experimental approaches. *Journal of Energy Storage*, 27, 101118.
- Nandwani, S. (2005). *Energía Solar: Conceptos Básicos y su Utilización*. junio 08, 2020, de Laboratorio de Energía Solar, Departamento de Física, Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica (Centro América) Sitio web: [https://sistemamid.com/panel/uploads/biblioteca/2014-06-27\\_10-14-37105995.pdf](https://sistemamid.com/panel/uploads/biblioteca/2014-06-27_10-14-37105995.pdf)