



Modelación de un acumulador de energía con material con cambio de fase en tubos excéntricos y aletados

Modeling of an energy storage with phase change material in eccentric and finned tubes

César A. Cisneros Ramírez^{1,*}, Eduardo Miguel Matheu Muñiz¹, Carlos Fernández-Aballí Altamirano¹

I. Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, Centro de Estudio de Tecnologías Energéticas Renovables (CETER). La Habana, Cuba

II. Velogía LLC, Saint Augustine, Florida, USA

*Autor de correspondencia: cesar@ceter.cujae.edu.cu, cacisnerosramirez@gmail.com

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento-No Comercial 4.0 internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) 

Recibido: 15 de mayo de 2020

Aceptado: 30 de junio de 2020

Resumen

En este trabajo se realizó la modelación y simulación de un acumulador de energía con material con cambio de fase. La dimensión característica utilizada para los cálculos fue el diámetro hidráulico para con ello, mantener constante la cantidad de material de cambio de fase al variar la geometría. El objetivo fue determinar la influencia conjunta de la excentricidad y de las aletas en proceso térmico en el acumulador. El resultado obtenido fue que la presencia de estos dos aspectos tiene un considerable efecto en el

aumento de la fracción de líquido durante el proceso de fusión, por lo tanto, reduciendo el tiempo necesario para la fusión total. Además, se obtuvo una expresión para la determinación de la fracción de líquido en función de los criterios adimensionales Fourier, Stefan y Rayleigh.

Palabras claves: acumulación de energía; modelación y simulación; tubos excéntricos y aletados.

Abstract

You must have at least 100 words and maximum 150, writing in a paragraph. The study of simultaneous flow of liquid and gas over a conduit is two phases flow combinations more complex that exist. For the study we select fluid (glycerin in solution with water (80 %) and industrial gel) that establish flow models necessary for the investigation the desired systems. And is obtained from physical-mathematical analysis of obtained results made experiment for different configurations, a theorys experimental model have evaluate the drag coefficient and force acting on only bubble and train

bubbles in job regimen for Reynolds value less and equal to 15. In the present study was performed computational modeling of different patterns, validated with experimental results. Simulations and results obtained for visualizing and analyzing the actual system behavior. These models are ready for been used for other configurations in future studies for other configurations in future studies.

Key words: storage energy; model and simulation; eccentric and finned tubes.

Cómo citar este artículo:

Cisneros Ramírez CA, Matheu Muñiz EM, Fernández-Aballí Altamirano C. Modelación de un acumulador de energía con material con cambio de fase en tubos excéntricos y aletados. Ingeniería Mecánica. 2020;23(3):e611. ISSN 1815-5944.

Introducción

Los estudios llevados a cabo con materiales con cambio de fase (MCF) han sido dirigidos a evaluar el comportamiento de los materiales como medios para acumular energía, a lograr métodos para la modelación de estos materiales, al diseño de equipos acumuladores de energía, entre otras líneas de estudio. El almacenamiento con MCF promete buen desempeño y fiabilidad y tiene la ventaja de que en ellos se logra alta densidad de energía almacenada y a su vez, la energía almacenada y liberada se logra a temperatura constante o en pequeños intervalos de temperatura. La baja conductividad térmica de los MCF es la principal desventaja de estos tipos de acumuladores, lo cual conlleva a una baja razón de descarga y carga de energía. Esto es por lo que se hacen necesarias las técnicas de intensificación de la transferencia de calor en estos equipos [1].

El efecto de la instalación de aletas sobre las características de fusión del MCF en un acumulador concéntrico fue analizado por [2]. El MCF empleado fue ácido láurico. Los autores emplearon una simple aleta la cual fue

colocada a diferentes ángulos y obtuvieron la dependencia de la fracción de líquido f con los criterios de Stefan, Fourier y Rayleigh.

El trabajo experimental desarrollado por [3] fue enfocado a determinar la influencia de la excentricidad del tubo interior sobre el tiempo de fusión del MCF. Los autores realizaron experimentos para temperaturas de 75; 80 y 85 grados centígrados. Los resultados mostraron que la conducción fue el mecanismo dominante al comienzo del proceso de fusión. Luego de pocos minutos, el mecanismo de convección natural se convierte en el modo predominante. Los autores concluyen que la geometría con excentricidad responde favorablemente al proceso de fusión y mejora el proceso de transferencia de calor dentro del MCF debido a la intensificación del mecanismo de convección natural.

Kamkari B [4], en su trabajo experimental, emplearon como MCF ácido láurico con 99 % de pureza. Los experimentos fueron desarrollados en recintos aletados y no aletados a diferentes temperaturas de superficie (50; 60 y 70 °C). Obtuvieron dos correlaciones para representar la fracción de líquido y el número de Nusselt en función de criterios adimensionales.

A mayor número de Stefan, más difícil es la solución numérica, llámese convergencia, del problema de cambio de fase. Para resolver este problema en [5] dividieron la solución en dos etapas. En la primera etapa consideraron un proceso dominado por el mecanismo de conducción, con lo cual excluyeron de la solución la ecuación de Navier-Stokes. En la segunda etapa incluyeron esta ecuación para considerar la convección.

Saiwei Li [6] plantea que las aletas pueden incrementar el área de transferencia de calor, pero también puede conducir a una disminución del coeficiente de traspaso de calor. Para una temperatura de pared determinada, la cantidad de aletas puede ser optimizada. Si la cantidad de aletas excede la cantidad óptima, el flujo de calor disminuye. Ellos apuntaron que cuando la cantidad de aletas fue mayor que 10, el aumento del área no era suficiente para revertir el efecto de disminución del coeficiente de traspaso de calor.

Un trabajo analítico relacionado con el uso de aletas longitudinales en un recinto circular horizontal para fusión, desarrollado por Rozenfeld, T et al [7], muestra la dependencia de la fracción de líquido con los números de Fourier y Stefan y con el ángulo de colocación de la aleta. Otros trabajos interesantes relacionados con el aumento de transferencia de calor en equipos de almacenamiento de energía con MCF son los de Sharma S [8] y Sarbu I [9].

En este trabajo, se llevó a cabo una simulación numérica para determinar la influencia de la excentricidad junto a la adición de aletas en la fusión de un MCF en un sistema de tubos concéntricos horizontal. El estudio se realizó para dimensión 2D. El resultado obtenido fue que la presencia de estos dos aspectos tiene un considerable efecto en el aumento de la fracción de líquido durante el proceso de fusión, por lo tanto, reduciendo el tiempo necesario para la fusión total. Además, se obtuvo una expresión para la determinación de la fracción de líquido en función de los criterios adimensionales Fourier, Stefan y Rayleigh y además del índice de subenfriamiento y la excentricidad.

Metodología

Modelo físico y condiciones de contorno

El modelo físico consiste de dos tubos concéntricos. El diámetro del tubo exterior y del tubo interior es 40 y 20 mm respectivamente. La posición del tubo interior fue variada en la dirección vertical, con lo cual se garantiza la excentricidad. Las aletas fueron colocadas a 0; 45; 90; 135 y 180 grados desde la vertical. Para disminuir el esfuerzo en la búsqueda de la solución, se acudió a la simetría del modelo físico y solo se trabajó con la mitad de todo el modelo.

La principal diferencia de este trabajo con otros trabajos radicó en la dimensión característica utilizada para calcular los criterios adimensionales Fourier, Stefan y Rayleigh. Otros autores emplearon como dimensión característica el diámetro interior del tubo exterior y en este trabajo se tomó el diámetro hidráulico [10]. Esta decisión se tomó debido a que cuando se colocan aletas en el ánulo formado por ambos tubos, el área ocupada por el MCF disminuye, disminuyendo así la cantidad de este. Existe relación entre la cantidad, altura y espesor de las aletas y la cantidad de MCF. Esta es la razón por la que se escogió constante el área ocupada por el MCF.

La dimensión característica l_c se calculó según la expresión 1:

$$l_c = \frac{4 \cdot \text{área de PCM}}{\text{perímetro húmedo}} \quad (1)$$

La excentricidad se calculó según la expresión 2

$$\varepsilon = \frac{x}{r_o - r_i} \quad (1)$$

En la expresión 2, x es la distancia movida del tubo interior en la dirección vertical (excentricidad) y el término $r_o - r_i$ es el espacio anular entre los tubos.

La altura de las aletas se obtuvo a través de la expresión 3 en la cual θ es el ángulo de ubicación de la aleta alrededor del tubo y c es la holgura entre la aleta y el tubo exterior.

$$h = (r_o - r_i) \left(1 + \frac{x}{r_o} \cos(\theta) \right) - c \quad (2)$$

El número de Stefan se calculó según la expresión 4, donde h_{sl} es el calor de cambio de fase y c_p es la capacidad calorífica del MCF. T_s y T_m son la temperatura de la superficie del tubo y de cambio de fase.

$$Ste = \frac{c_p (T_s - T_m)}{h_{sl}} \quad (3)$$

Los números de Rayleigh y Fourier se determinaron por las expresiones 5 y 6 respectivamente, donde β , ν y α son el coeficiente de dilatación volumétrica, viscosidad cinemática y la difusividad térmica respectivamente, del MCF.

$$Ra = \frac{g\beta(T_s - T_m)l_c^3}{\alpha\nu} \quad (4)$$

$$Fo = \frac{\alpha\tau}{l_c^2} \quad (6)$$

El índice de subenfriamiento se determinó según la expresión 7, donde T_i es la temperatura inicial del MCF.

$$I_{sub} = \frac{T_m - T_i}{T_s - T_m} \quad (7)$$

El análisis se realizó para temperatura de superficie de 333 (60), 343 (70) y 353 (80) K (C) y temperatura inicial del sólido de 305 y 310 K. Esos valores corresponden a valores del número de Stefan (Ste) de 0,21; 0,34 y 0,48. El número de Rayleigh (Ra), que depende de T_s , toma valores desde $1,69 \times 10^6$ a $1,36 \times 10^7$. El subenfriamiento del sólido (dt_{sub}) toma valores de 12 y 7 K y el índice de subenfriamiento (I_{sub}) toma valores de 0,75; 0,46; 0,33 en un caso y 0,44; 0,27; 0,19 en el otro caso.

Las propiedades termofísicas del MCF se muestran en la, tabla 1:

Tabla 1. Propiedades termofísicas del ácido láurico (ácido dodecanoico). Fuente autores

Capacidad calorífica a presión constante (kJ/kg*K)	2300
Temperatura de fusión (K)	317
Calor latente de fusión (kJ/kg)	173800
Densidad (kg/m ³)	862,7
Viscosidad Cinemática (m ² /s)	5,33e-6, (T = 333K)
	4,2929e-6, (T = 343K)
	3,469e-6, (T = 353K)
Conductividad térmica (W/m*K)	0,417
Coeficiente de expansión volumétrica (K ⁻¹)	6,15e-6

El incremento de la fracción de líquido (I_f) se definió como la fracción de líquido antes y después de aplicar la excentricidad y las aletas, expresión 8. Esta relación se empleó para estudiar el aumento de la transferencia de calor cuando se aplicaron la excentricidad y las aletas.

$$I_f = \frac{f_{con}}{f_{sin}} \quad (8)$$

En esta ecuación, f_{con} y f_{sin} representaron la fracción de líquido después y antes de ser aplicadas la excentricidad y las aletas, respectivamente

Modelo matemático

El proceso se consideró no estacionario, laminar, incompresible y en dos dimensiones. El término de disipación viscosa se consideró despreciable. El flujo viscoso e incompresible y la distribución de temperaturas se resolvieron con las ecuaciones de continuidad (9), momento (10, 11), y la ecuación de la energía (12), respectivamente. Para dos dimensiones, estas ecuaciones se expresaron como sigue:

Continuidad

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{1}{r} \frac{\partial (r \rho u_r)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial (r \rho u_\theta)}{\partial \theta} = 0 \quad (9)$$

Momento:

$$\frac{\partial (u_r)}{\partial \tau} + (\vec{u} \cdot \nabla u_r) - \frac{u_\theta^2}{r} = -g\beta \cos \theta (t - t_m) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \nu \left(\nabla^2 u_r - \frac{2}{r^2} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} - \frac{u_r}{r^2} \right) + \vec{S} \quad (10)$$

$$\frac{\partial (u_\theta)}{\partial \tau} + (\vec{u} \cdot \nabla u_\theta) - \frac{u_r u_\theta}{r} = -g\beta \sin \theta (t - t_m) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial \theta} + \nu \left(\nabla^2 u_\theta - \frac{2}{r^2} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} - \frac{u_\theta}{r^2} \right) + \vec{S} \quad (11)$$

Energía:

$$\frac{\partial (\rho H)}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} H) = k \left(\frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right) \quad (12)$$

Donde, u_i es la velocidad del fluido, ρ y μ son la densidad y viscosidad dinámica del MCF, p es la presión, g es la aceleración de la gravedad, k es la conductividad térmica del MCF y h es la entalpía. La entalpía se define como la suma de la entalpía de referencia h_{ref} , la entalpía sensible la cual es una integral y la entalpía latente ΔH , expresión 13.

$$h = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T c_p dT + \Delta H \quad (13)$$

El calor latente ΔH se calculó a través del calor latente L del material con la expresión 14

$$\Delta H = f \cdot L \quad (14)$$

Donde la fracción de líquido f se definió como, expresión 15:

$$f = \begin{cases} 0 & T < T_s \\ \frac{T - T_s}{T_l - T_s} & T_s < T < T_l \\ 1 & T > T_l \end{cases} \quad (15)$$

En las ecuaciones 10 y 11, \vec{S} es el término fuente (Darcy) debido al efecto del cambio de fase sobre la convección [11]. Esta se definió según la expresión 16

$$\vec{S} = -\frac{C(1-f)^2}{f^3 + a} \vec{u} \quad (16)$$

La constante C se toma de un valor grande para eliminar la velocidad en las celdas (volúmenes) que corresponden a sólidos. El término a tiene un valor pequeño, empleado para prevenir la división por cero cuando la celda (volumen) es localizada en la región sólida.

Solución

Tres mallas fueron estudiadas, de 44000, 168000 y 372000 celdas para obtener la independencia del sistema de la malla. Para los sistemas con excentricidad y aletas se logró que la desviación de los resultados fue menor que el 1 % con 168000 celdas. Para el caso de tubos concéntricos y sin aletas, la cantidad de celdas que garantizaron una desviación menor al 1 % fue de 372000.

Al abordar el cálculo se tomaron las experiencias surgidas en previos trabajos como [12, 13]. Para procesar el acoplamiento presión-velocidad se aplicó el algoritmo SIMPLE y el esquema QUICK para resolver las ecuaciones de momento y energía, mientras que el esquema PRESTO se empleó para la ecuación de corrección de la presión.

Se realizaron las siguientes suposiciones en este estudio:

- Se asumió la aproximación de Boussinesq, en la cual las propiedades de cada fase se mantienen constante. Solo se consideró el efecto de cambio de densidad del fluido sobre la flotación
- La zona de mezcla se consideró como un medio poroso, ignorándose la aceleración convectiva y la difusión.
- El coeficiente de expansión del MCF es pequeño y el flujo de la fase líquida provocado por la diferencia de densidades se desprecia ante el provocado por convección natural

Para las ecuaciones de momento y energía se utilizó para la discretización el esquema *upwind* de segundo orden. Los factores de subrelajación fueron 0,3; 1; 0,7; 0,9 y 1 para la presión, la densidad, fuerzas másicas y momento, respectivamente. El paso del tiempo se tomó 0,02 s. La máxima cantidad de iteraciones para cada paso de tiempo se estableció en 50, lo cual satisface el criterio de convergencia de la ecuación de continuidad

(10-4), el de la energía (10-6) y de velocidad (10-4). El valor de C y a utilizados fueron 1015kg/sm3 y 0,0001 respectivamente.

Resultados y Discusión

En esta sección se reportan los resultados concernientes a los casos del uso de aletas, excentricidad y temperatura como condiciones de frontera. Los resultados que se presentan son de la fracción de líquido e incremento de la fracción de líquido en función del tiempo

La figura 1 muestra la fracción de líquido para tiempos de 5 y 10 minutos cuando la excentricidad es 0,01 y 0,016 para temperatura inicial del MCF de 305 K y temperatura de la superficie de 353 K.

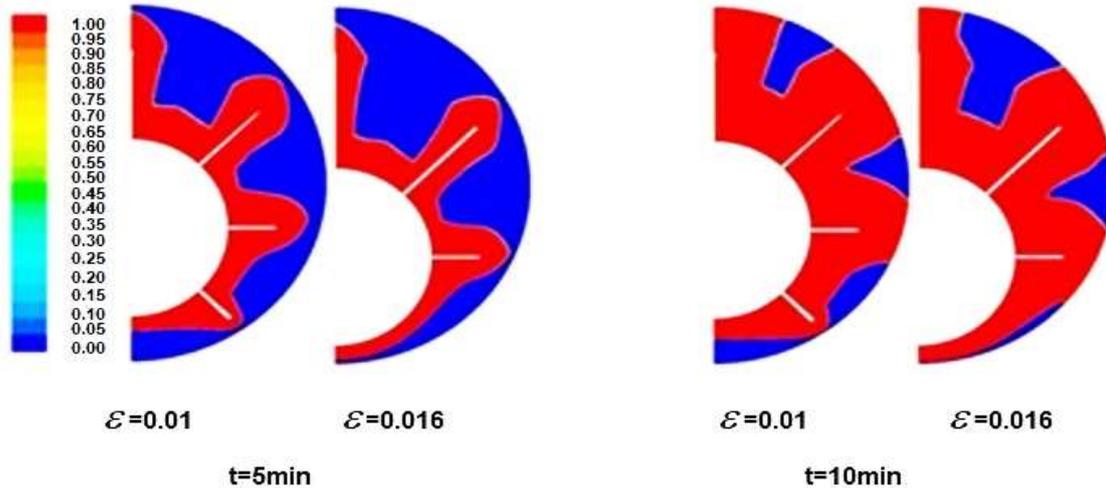


Fig. 1. Contorno de fracción de líquido. Fuente: autores

La figura 2 muestra la fracción de líquido contra el tiempo para cada excentricidad. Para el caso concéntrico ($\epsilon=0$) los resultados se toman en cuenta sin considerar las aletas. Se hizo la comparación para temperatura de superficie de 305 y 310 K. Se puede observar que el tiempo necesitado para obtener total fusión del MCF, o sea $f=1$, es menor (aproximadamente 50 %) en caso de aplicar excentricidad y aletas que cuando no se aplican.

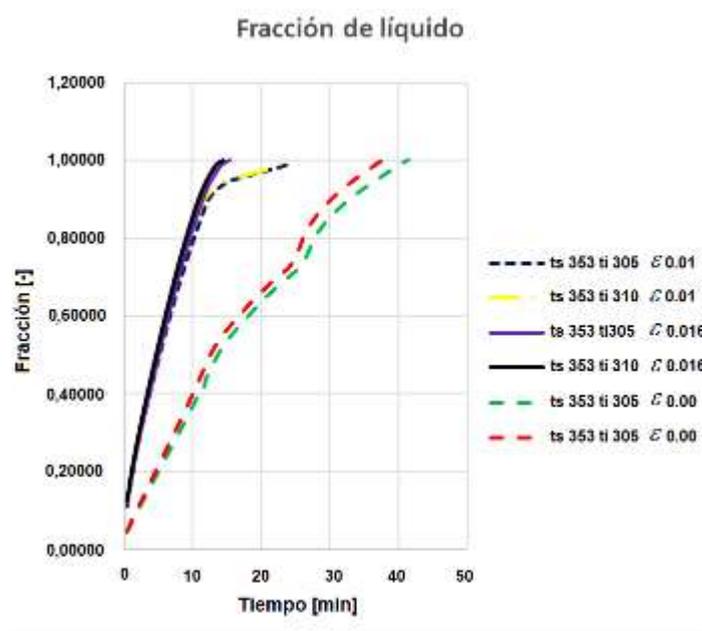


Fig. 2. Fracción de líquido vs tiempo. Fuente: autores

En la tabla 2 se recoge el incremento de la fracción de líquido al variar la temperatura de superficie y mantener constante la temperatura inicial para excentricidades $\epsilon = 0; 0,01$ y $0,016$. El incremento oscila entre 1,24 a 1,61.

Tabla 2. Incremento de la fracción al variar la temperatura de superficie, manteniendo la temperatura inicial constante. Fuente: autores

Incremento promedio de la fracción al variar la temperatura de superficie y la excentricidad manteniendo constante la temperatura inicial				
T_s	305		310	
		343/333	353/333	343/333
ϵ	0			
l_f	1,32	1,61	1,25	1,53
ϵ	0,01			
l_f	1,34	1,60	1,31	1,55
ϵ	0,016			
l_f	1,24	1,46	1,23	1,43

La influencia sobre el incremento de la fracción de líquido cuando se varía la temperatura inicial (subenfriamiento) del MCF sólido, manteniendo constante la temperatura de superficie cuando la excentricidad es $\epsilon = 0,01$ se recoge en la tabla 3. De forma general el incremento promedio es de 1,05 (última fila de la tabla 3), lo cual no es de un valor significativo.

Tabla 3. Incremento de la fracción al variar la temperatura inicial, manteniendo constante la temperatura de superficie. Fuente: autores

Incremento promedio de la fracción al variar la temperatura inicial manteniendo constante la temperatura de superficie									
ϵ	0			0,01			0,016		
	T_s	333	343	353	333	343	353	333	343
	310/305								
l_f	1,11	1,05	1,06	1,05	1,04	1,03	1,04	1,05	1,04

Por otro lado, la tabla 4 recoge el incremento de la fracción de líquido cuando se varía la excentricidad. En este caso, el incremento fluctúa entre 1,86 a 2,36 (última fila de la tabla 4), lo cual es un valor de incremento significativo. Este comportamiento está justificado por la influencia de la convección natural la cual se hace más manifiesta por la mayor porción de MCF involucrado en ella.

Tabla 4. Incremento de la fracción cuando se varía la excentricidad. Fuente: autores

Incremento promedio de la fracción al variar la excentricidad, la temperatura inicial y la temperatura de superficie												
ϵ	0,01						0,016					
	305			310			305			310		
T_s	333	343	353	333	343	353	333	343	353	333	343	353
l_f	1,86	2,04	1,99	1,77	2,04	1,95	2,21	2,36	2,33	2,07	2,39	2,29

A manera de comparación con resultados reportados en la literatura, se puede citar que los valores de fracción de líquido respecto al tiempo, reportados por Yuan Y, et al. [2], son menores a los obtenidos por este autor. En aquel trabajo también se utilizó como MFC ácido lúrico y además se tuvo en cuenta la presencia de aletas colocadas a diferentes ángulos, pero, no se tuvo en cuenta la excentricidad. La dependencia de la fracción obtenida por esos autores es función del parámetro $SteFoRa^{1/6}$. En esa misma dirección de investigación con la presencia de aletas es el trabajo desarrollado por Rozenfeld T, et al. [7]. Los autores obtuvieron la dependencia de la fracción de líquido en función del parámetro $FoSte^{3/4}$.

Yazıcı M, et al. [3] realizaron su trabajo empleando parafina y tuvieron en cuenta la excentricidad, pero, no tuvieron en cuenta la presencia de las aletas. Resultó que al aumentar la excentricidad disminuyó el tiempo para lograr la fusión total MCF, llegando a obtener un 67 % de disminución de ese tiempo. Esta disminución también estuvo favorecida por la elevación de la temperatura inicial del MCF.

Los resultados obtenidos en este trabajo muestran valores mayores que los obtenidos en los tres trabajos tomados como referencia para la comparación. Esto es debido a la superposición de los efectos individuales de la excentricidad y la presencia de aletas. Incremento en los valores de la fracción

En este trabajo se correlacionó la fracción de líquido con criterios adimensionales que rigen la transferencia de calor tanto en la conducción como en la convección. Se estableció, a partir de los resultados, una relación entre la fracción de líquido (f) y los parámetros Stefan (Ste), Fourier (Fo), Rayleigh (Ra), excentricidad (ϵ) y el índice de subenfriamiento (I_{sub})

La correlación se muestra en la figura 3 y es dada por la expresión 17 la cual establece $R^2 = 95,47\%$, $R^2_{adjusted} = 95,46\%$, $StdError = 0,0596852$ y un error absoluto medio (MAE) = $0,0463161$.

$$f = 0,0650479 + 0,595059 X + 0,371937 X^2 \quad (17)$$

La expresión 17 es utilizable para los siguientes límites de validez: $1,69 \times 10^6 \leq Ra \leq 1,36 \times 10^7$; $0,212 \leq Ste \leq 0,476$; $7 \leq I_{sub} \leq 12$.

Donde, el término X se obtiene por la expresión 18

$$X = 0,117628 \frac{(Fo \cdot Ste)^{0,38}}{\ln(Ra^{0,01})} - 0,472569 \exp\left(\frac{\varepsilon}{I_{sub}}\right) \quad (18)$$

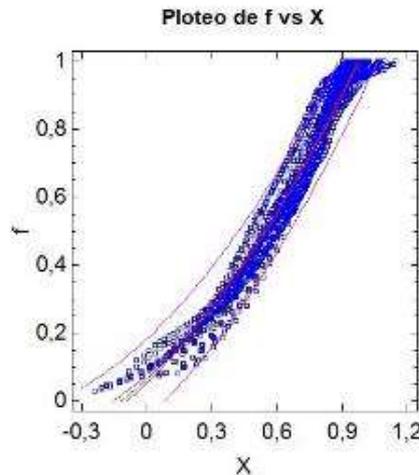


Fig. 3. Fracción contra el parámetro.
Fuente: autores

La expresión obtenida por este autor difiere de las obtenidas, por los autores antes mencionados, en que se tiene en cuenta la excentricidad y el índice de subenfriamiento en conjunto con los criterios adimensionales empleados por aquellos autores.

La principal limitación del trabajo radica en que los resultados obtenidos son para el caso de fusión del MCF, es decir, es válido para el período de carga del acumulador de energía. ¿Cuál será el comportamiento para el período de descarga? La respuesta está condicionada por la característica de la solidificación, lo cual será motivo de otro trabajo.

Conclusiones

La superposición del efecto de la excentricidad y la presencia de aletas mejora la razón de formación de la fracción de líquido.

El efecto del índice de subenfriamiento es pequeño comparado con el efecto de la excentricidad. Para el primero se obtienen valores de incremento entre 5 a 11 % y para el segundo, valores que superan 85 %

Necesidad de incluir tanto la excentricidad como el índice de subenfriamiento en el cálculo de la fracción de líquido.

Referencias

- Agyenim F. The use of enhanced heat transfer phase change materials (PCM) to improve the coefficient of performance (COP) of solar powered LiBr/H₂O absorption cooling systems. *Renewable Energy*. 2016;87:229-239. DOI 10.1016/j.renene.2015.10.012.
- Yuan Y, Cao X. Effect of installation angle of fins on melting characteristics of annular unit for latent heat thermal energy storage. *Solar Energy*. 2016;136:365-378. DOI 10.1016/j.solener.2016.07.014.
- Yazıcı MY, Avcı M. Effect of eccentricity on melting behavior of paraffin in a horizontal tube-in-shell storage unit: An experimental study. *Solar Energy*. 2014;101:291-298. DOI 10.1016/j.solener.2014.01.007.
- Kamkari B, Shokouhmand H. Experimental investigation of phase change material melting in rectangular enclosures with horizontal partial fins. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2014;78:839-851. DOI 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.07.056.
- Pinelli M, Piva S. Solid Liquid Phase Change in Presence of Natural Convection: a Thermal Energy Storage Case Study. *Journal of Energy Resources Technology*. 2003;125.
- Saiwei Li; Chen Y. Numerical Simulation and Optimization of the Melting Process of Phase Change Material inside Horizontal Annulus. *Energies*. 2017;10. DOI 10.3390/en10091249.
- Rozenfeld T, Kozak Y. Close-contact melting in a horizontal cylindrical enclosure with longitudinal plate fins: Demonstration modeling and application to thermal storage. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2015;86:465-477. DOI 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.02.064.
- Sharma SK, Singhai AA. Review on Phase Change Materials in Domestic Refrigeration Systems. *International Journal of Innovative Engineering Research*. 2017;7(4).
- Sarbu I, Dorca A. Review on heat transfer analysis in thermal energy storage using latent heat storage systems and phase change materials. *Int J Energy Researc*. 2019;43:29-64. DOI 10.1002/er.4196.
- Bergman TL, Lavine AS. *Fundamental of Heat and Mass Transfer*. USA: John Wiley & Sons; 2011.
- Brent AD, Voller VR. Enthalpy-porosity Technique for Modeling Convection-Diffusion Phase Change: Application to the Melting of a Pure Metal. *Numerical Heat Transfer. Journal of Computation and Methodology*. 1988;13(3):297-318. DOI 10.1080/10407788808913615

12. Zeng L, Lu J. Numerical study of the influences of geometry orientation on phase change material's melting process. *Advances in Mechanical Engineering*. 2017;9(10):1-11. DOI 0.1177/1687814017720084

13. Cao X, Yuana Y. Numerical investigation on optimal number of longitudinal fins in horizontal annular phase change unit at different wall temperatures. *Energy and Buildings*. 2018;158:384-392..

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses

Contribución de los autores

César Cisneros Ramírez. <https://orcid.org/0000-0002-9969-801X>

Participó en el diseño de la investigación y en la revisión del estado del arte Trabajó en la recolección y el procesamiento de los datos para el estudio. Realizó contribuciones en el análisis e interpretación de los datos y en el análisis de los resultados. Participó en la revisión crítica de su contenido así como en la redacción y aprobación del informe final

Eduardo Miguel Matheu Muñiz. <https://orcid.org/0000-0002-6187-2481>

Participó en los cálculos y en el análisis de los resultados, trabajó en: el diseño de la investigación, en la revisión crítica de su contenido así como en la redacción y aprobación del informe final.

Carlos Fernández Aballí Altamirano. <https://orcid.org/0000-0002-5191-2937>

Apoyó en la revisión del estado del arte y diseño de la investigación. Trabajó en la recolección de los datos y en la revisión crítica de su contenido así como en la redacción y aprobación del informe final