

ELEMENTOS CILINDRICOS UTILIZADOS COMO COLECTORES - ACUMULADORES CON SUSTANCIAS DE CAMBIO DE FASE

M. Morales, A. Boucíguez

Facultad de Ciencias Exactas. Universidad Nacional de Salta.
Av. Bolivia 5150 – Salta, Argentina. Tel 0387 –4255424. e-mail: bouciga@unsa.edu.ar

RESUMEN: Se estudia el comportamiento de sustancias de cambio de fase contenidas en recipientes cilíndricos para su utilización como colectores acumuladores en aplicaciones agrícolas. La sustancia, inicialmente sólida a la temperatura de fusión es sometida a condiciones externas de temperatura ambiente mayor a ésta, por todos sus laterales, lo que da lugar a una variación de temperatura y posición de la interfase sólido – líquido en las coordenadas espaciales: radial y longitudinal en el transcurso del tiempo. Los resultados obtenidos muestran que resultan aptas a estos fines y pueden significar un ahorro importante de energía convencional.

Palabras claves: cambio de fase, geometría cilíndrica, colectores – acumuladores, interfase.

INTRODUCCION

El uso de sustancias de cambio de fase, como colectores - acumuladores ha sido propuesto con anterioridad por diversos autores (Grodzka, 1980; Farid et al., 2004) con paredes de geometría plana que pueden ser construidas especialmente o adosadas al recinto a acondicionar.

En algunos casos es conveniente que el colector acumulador tenga otra geometría, en particular la cilíndrica ofrece la posibilidad de poderlo ubicar tanto en posición horizontal como vertical, a la vez de transferir calor por su superficie lateral y basal (Abhat, 1983; Ahmad, 2001; Battig et al, 1972). Además esta geometría permite la construcción de acumuladores de menor tamaño y peso que puedan ser movidos dentro del recinto de acuerdo a los requerimientos de acumulación de cada situación particular; lo que puede ser sumamente útil en invernaderos, secaderos, piletas de cultivo, etc.

La mayor parte de los problemas presentados con esta geometría en bibliografía se refieren a ductos en que la sustancia de trabajo es agua (Hirata, 1991; Hinaba, 1991; Lock, 1991; Lunardini, 1991; Xiaomin et al., 1994). Esta sustancia presenta problemas debido a la diferencia de densidades entre las fases líquida y sólida y a su dilatación anómala, lo que puede resultar en la rotura de los contenedores. Las sustancias orgánicas no presentan estos inconvenientes, pues la diferencia de densidades es relativamente pequeña y el volumen específico del sólido es menor que el del líquido. Por otra parte, hay una gran variedad de ellas con un amplio rango de temperaturas de fusión que pueden utilizarse, de acuerdo a la temperatura que se desee mantener el recinto; siendo también más adecuadas que las inorgánicas (Hamdan y Elwerr, 1996; Hasan y Saying, 1994; Lock, 1991; Sari y Kaygusuz, 2001; Tunçbilek et al., 2005).

Por tanto, resulta interesante el estudio del comportamiento de tales sustancias envasadas en recipientes cilíndricos, que puedan ubicarse dentro del propio recinto a acondicionar e incluso moverse dentro del mismo. Para ello se ha comenzado el estudio en esta geometría considerando primero el efecto sobre la coordenada radial (Morales y Boucíguez, 2007), presentado en este trabajo, el efecto de esta coordenada y de la longitudinal; esto es las coordenadas (r,z) , asumiendo que el problema presenta simetría acimutal. El recipiente cilíndrico que contiene la sustancia de cambio de fase, puede tener una cavidad interna, de radio interior R_1 y exterior R_2 siendo su longitud a , se presenta en la Figura 1 un esquema de tal recipiente.

Como se analiza el caso en que absorban calor, la sustancia debe encontrarse inicialmente sólida; la situación más desfavorable es aquella en que ella esté sólida a la temperatura de fusión, dado que el calor recibido se utiliza directamente en producir el cambio de fase. Este problema se denomina de Stefan a una fase, puesto que si bien ambas están físicamente presentes, la fase sólida permanece a la temperatura de fusión, por lo que solamente debe determinarse la distribución de temperaturas en la fase líquida y la posición de la interfase.

A los fines de evaluar el comportamiento de la sustancia de cambio de fase se ha realizado un modelo de simulación numérica para obtener la velocidad de avance del frente de fusión y distribución de temperatura cuando se encuentra sometida a condiciones de temperatura externa desde su superficie lateral y basal. En las secciones que siguen se presenta la formulación matemática del problema, el modelo de simulación, los resultados obtenidos y las conclusiones y consideraciones a las que pueden arribarse de este estudio.

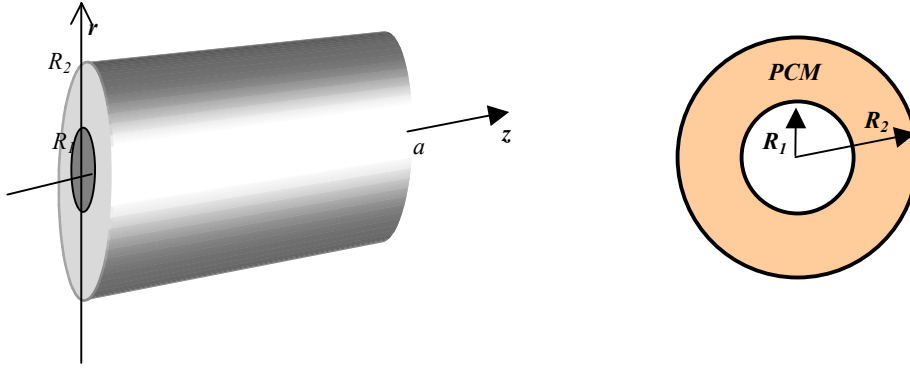


Figura 1: Esquema del recipiente cilíndrico. Vista lateral y frontal

FORMULACION DEL PROBLEMA.

El problema consiste en evaluar la distribución de temperaturas en la fase líquida y las posiciones de las interfases. Para ello se ha utilizado el modelo entálpico, el que considerando las dos coordenadas espaciales (r,z) y el tiempo t ; sujeta a las correspondientes condiciones iniciales y de borde, calcula precisamente la entalpía $h(r,z,t)$ y con ella las temperaturas $T(r,z,t)$, y la fracción de líquido presente $\lambda(t)$, obteniéndose a partir de esta última la posición de las interfases $s(t)$. Si se designa con k a la conductividad térmica de la sustancia de cambio de fase, con ρ a la densidad, con c al calor específico y con L al calor latente de fusión, el problema matemático resulta descrito por el sistema de ecuaciones (1) a (6), siendo $q(r,z,t) = -k \text{grad}t(r,z,t)$ el calor transferido en el interior del material (Alexiades y Solomon, 1993; Zerroukat, M y Chatwin, 1994).

$$\frac{\partial h(r,z,t)}{\partial t} + \text{div}[q(r,z,t)] = 0 \quad t > 0 \quad (1)$$

$$T(r,z,t) = \begin{cases} T_f, & 0 < h < \rho \cdot L \\ T_f + \frac{h(r,z,t) - \rho \cdot L}{\rho \cdot c}, & h \geq \rho \cdot L \end{cases} \quad \forall t > 0 \quad (2)$$

$$\lambda(r,z,t) = \begin{cases} \frac{h(r,z,t)}{\rho \cdot L}, & 0 < h < \rho \cdot L \\ 1, & h \geq \rho \cdot L \end{cases} \quad (3)$$

$$h(r,z,0) = 0, \quad T(r,z,0) = T_f, \quad \lambda(r,z,0) = 0, \quad \forall r > 0, \quad \forall z > 0 \quad (4)$$

$$T(r,0,t) = T_z, \quad \frac{\partial T(r,a,t)}{\partial z} = 0, \quad T(R_1,z,t) = T_1, \quad T(R_2,z,t) = T_2 \quad (5)$$

$$\lambda(r,z,0) = 0 \quad (6)$$

El radio R_2 es igual a 0.20m y el R_1 es igual a 0.01m; ambas superficies se encuentran en contacto con fuentes a temperaturas conocidas T_2 y T_1 , respectivamente. También se ha considerado el caso en que el cilindro se encuentre aislado por su superficie lateral. El cilindro se considera de longitud a , por lo que la coordenada z , varía desde 0 a a ; la superficie correspondiente a $z=0$ se encuentra a una temperatura T_z , mientras que $z=a$ está aislada térmicamente. La condición inicial es sustancia sólida a la temperatura de fusión, por ello tanto la entalpía h , como la fracción de líquido presente λ son nulas en $t=0$.

RESOLUCIÓN NUMÉRICA

Para la resolución numérica del problema se ha realizado un modelo de simulación en lenguaje Matlab, que permite calcular la entalpía y con ella la distribución de temperaturas y la fracción de sustancia líquida en función del tiempo y con ella la posición de la frontera en función del tiempo. Para el cálculo se tomaron los valores de los parámetros térmicos típicos de estearatos de ácidos grasos: $k=0.15\text{W/m K}$, $\rho=778\text{ kg/m}^3$, $L=213\text{ kJ/kg}$, $c=2384\text{ J/kg K}$ (Swern, 1964, Hasan y Sayigh, 1994) La temperatura de fusión se consideró igual a 10°C , valor que corresponde al estearato de butilo comercial.

Se analiza el comportamiento de la sustancia sometido a condiciones de borde de temperatura constante en el tiempo y/o aislación adiabática; considerando tres casos diferentes dados en la Tabla 1.

Caso 1 (C1)	Caso 2 (C2)	Caso 3 (C3)
$T(R_1, z, t) = 30^\circ\text{C}$, $\forall z, t$	$T(R_1, z, t) = 30^\circ\text{C}$, $\forall z, t$	$T(R_1, z, t) = (30 - 0.8z)^\circ\text{C}$, $\forall t$
$\partial T(R_2, z, t) / \partial r = 0^\circ\text{C}$, $\forall z, t$	$T(R_2, z, t) = 30^\circ\text{C}$, $\forall z, t$	$\partial T(R_2, z, t) / \partial r = 0^\circ\text{C}$, $\forall z, t$
$T(r, 0, t) = 30^\circ\text{C}$, $\forall r, t$	$T(r, 0, t) = 30^\circ\text{C}$, $\forall r, t$	$T(r, 0, t) = 30^\circ\text{C}$, $\forall r, t$
$\partial T(r, a, t) / \partial z = 0^\circ\text{C}$, $\forall r, t$	$\partial T(r, a, t) / \partial z = 0^\circ\text{C}$, $\forall r, t$	$\partial T(r, a, t) / \partial z = 0^\circ\text{C}$, $\forall r, t$

Tabla 1: Distintas situaciones estudiadas para las condiciones de temperatura externa.

En todos los casos la superficie $z=a$, está aislada. En el primer caso, todas las paredes restantes se encuentran a 30°C ; en el segundo también se encuentra aislada la superficie lateral y en el tercero además de ésta última condición la superficie interior de la cavidad presenta una variación de temperatura en función de la coordenada z .

El tiempo total de cálculo es de 12 horas, pensando precisamente que estos materiales condicionarán un invernadero o un secadero. Este tiempo es el máximo durante el cual la sustancia de cambio de fase puede recibir calor durante el día, el resto del tiempo deberá entregarlo.

Las tres situaciones planteadas se reflejan las condiciones que pueden darse en un secadero o invernadero. En todos los casos se ha considerado que el cilindro se encuentra en posición horizontal. Las condiciones de temperatura constante señalan una temperatura promedio a la que puede estar el interior del habitáculo. La condición de radio exterior aislado, se ha tomado considerando que se desea mantener el recinto a una temperatura definida, la de fusión en este caso, durante las horas de la noche. El conducto interno no aislado puede asimilarse al paso de un fluido por su interior, el que podría ser aire o agua bombeado especialmente a los fines de acumular calor para su uso posterior o de evacuarlo en el momento en que se le hace circular

RESULTADOS OBTENIDOS

Los resultados obtenidos se presentan gráficamente en tres dimensiones, para los tres casos analizados; en ellos se ha representado la temperatura como función de la posición en ambas coordenadas espaciales, es decir $T(r, z)$ para 3, 6, 9 y 12 hs; estos tiempos se han elegido por ser representativos del aumento de temperatura y del avance del frente de fusión. El espectro de colores utilizado varía de rojo oscuro a azul, correspondiente a la variación de temperaturas de mayor a menor. Se observa en todos los casos que la zona de temperatura más baja corresponde a la porción de sustancia que se encuentra sólida a la temperatura de fusión. Estos resultados se presentan en las Figuras 2, 3 y 4; que corresponden, respectivamente a las situaciones planteadas en los casos 1, 2 y 3 de la Tabla 1. En cada una de ellas se aprecia la distribución de la temperatura de la sustancia de cambio de fase y el avance de la frontera dada por la curva que delimita la zona en azul del resto.

En la Figura 2, se presenta la distribución de temperaturas para el cilindro con superficie externa adiabática; correspondiente al caso 1, a las 3, 6, 9 y 12 horas de iniciado el proceso de exposición a la temperatura externa. En ella se visualiza también el avance de la interfase, que se produce desde el radio interior R_1 , hacia la superficie externa de radio R_2 . Como es de esperar a medida que el tiempo transcurre hay una mayor zona de sustancia en estado líquido, al cabo de 12 horas todavía permanece una zona a la temperatura de fusión a pesar haber sometido la superficie interna a una exposición prolongada de temperatura constante.

En la Figura 3 se presenta la distribución de temperaturas en función de las coordenadas (r, z) para los tiempos $t=3, 6, 9$ y 12 hs, para el caso del cilindro cuyas superficies externa, interna y frontal se encuentran sometidas a temperaturas constantes, correspondientes al caso 2 señalado en la Tabla 1. A diferencia de la situación anterior, se observa como la frontera avanza desde todas las superficies hacia el centro del cilindro.

Se aprecia en esta situación un avance desigual de la frontera desde las superficies interna y externa, a pesar de estar sometidas a la misma temperatura externa, esto es así debido a la geometría cilíndrica, puesto que el calor transferido por unidad de área es distinto en cada superficie, al ser precisamente distinto su radio. Se observa una zona en color azul en el centro del cilindro, esta representa a la sustancia a la temperatura de fusión, es decir que el material no se ha fundido completamente.

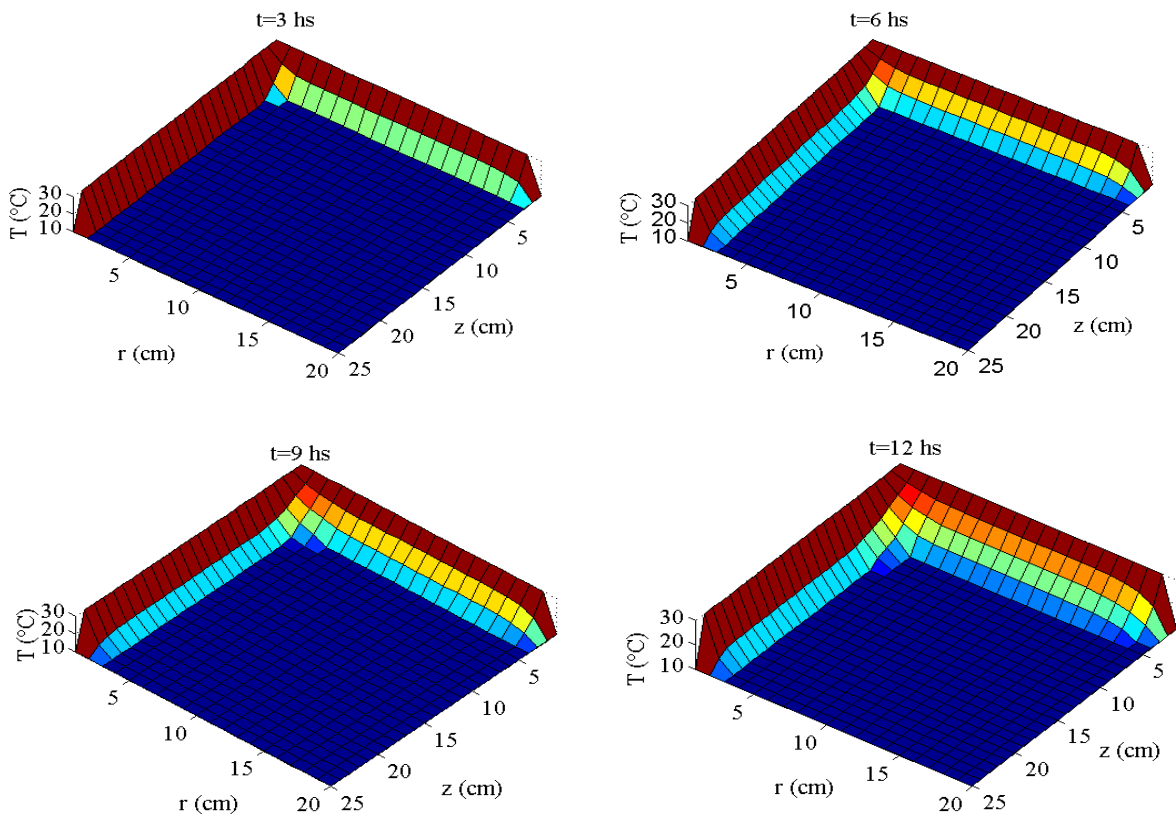


Figura 2: Distribución de temperaturas para el cilindro con superficie externa adiabática (caso 1).

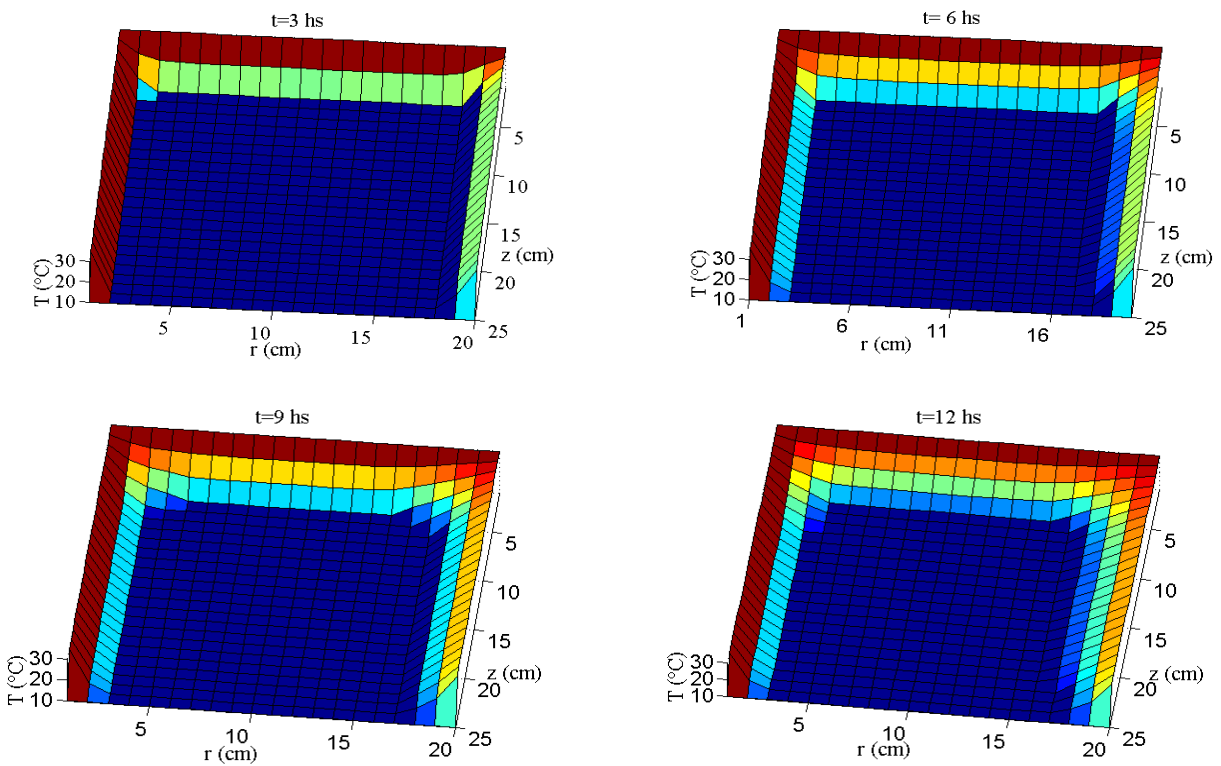


Figura 3: Distribución de temperaturas para el cilindro con superficie externa de temperatura constante (caso 2).

En la Figura 4 se presenta la distribución de temperaturas en función de las coordenadas (r,z) para los tiempos $t=3, 6, 9$ y 12 hs, para el caso del cilindro cuyas superficie externa se encuentra aislada, la interna sometida a una temperatura variable, correspondientes al caso 2 señalado en la Tabla 1. En ella se observa el efecto de aumento de la temperatura desde el radio interno así como el avance de la frontera desde este radio y en la coordenada longitudinal. La zona en color azul representa la temperatura de fusión y por tanto señala la porción de sustancia que permanece sólida, la separación entre este color y los demás señala la posición de la interfase.

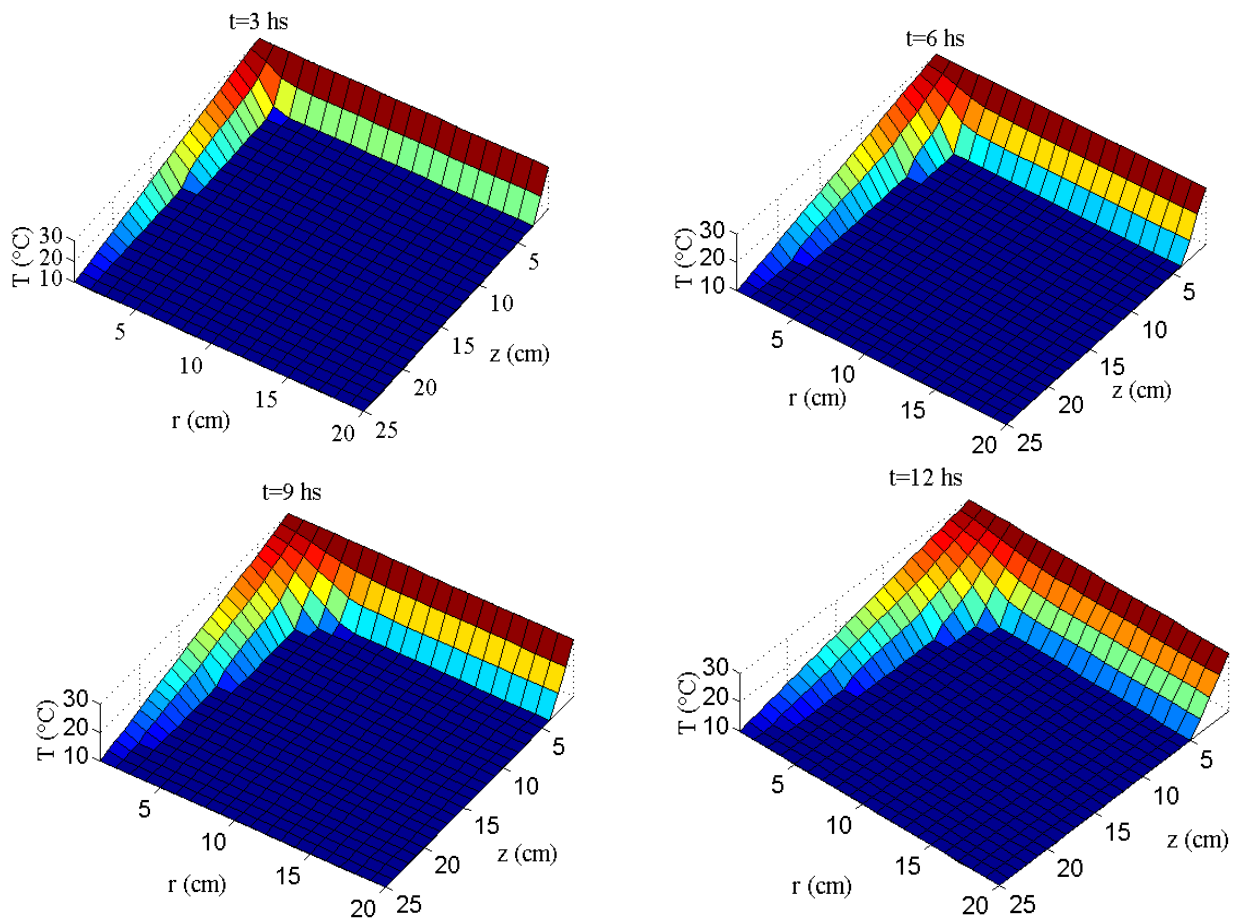


Figura 4: Distribución de temperaturas para el cilindro con superficie externa de temperatura creciente (caso3).

En todas las gráficas se observa claramente la posición de la interfase y la distribución de temperaturas en el interior del cilindro que contiene la sustancia de cambio de fase. Al cabo de 12 horas, para las condiciones propuestas la sustancia no se ha fundido completamente, por lo que evidencia que si las temperaturas externas fueran mayores, la sustancia podría seguir acumulando calor durante el día, que entregaría al recinto en horas de la noche para mantener las condiciones adecuadas de temperatura en el mismo.

CONCLUSIONES

El modelo de simulación proporciona una rápida visualización de la cantidad de sustancia en estado líquido y sólido dentro del cilindro, para las distintas condiciones de borde aplicadas, lo que permite inferir que cantidad de material de cambio de fase puede ser utilizada como acumulador así como también determinar las condiciones para lograr el mejor acondicionamiento del recinto.

Cualquier situación que presente geometría cilíndrica con condiciones de temperatura constante o variables en el tiempo, puede ser estudiada mediante el modelo de simulación numérica desarrollado. Con éste además, es posible determinar y visualizar rápidamente la posición de la frontera y la distribución de temperatura en la sustancia de cambio de fase

Los resultados obtenidos demuestran que estas sustancias poseen una gran capacidad de acumulación, lo que las hace útiles en sistemas de acondicionamiento pasivo, al mismo tiempo que contribuyen a disminuir el peso y el volumen de los colectores acumuladores frente a los tradicionales.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado en el marco del Proyecto de Investigación N° 1554, del Consejo de Investigaciones de la Universidad Nacional de Salta, a quien se agradece su financiamiento.

REFERENCIAS

- Abhat, A. (1983) Low Temperature Latent Heat Thermal Energy Storage: Heat Storage Materials. *Solar Energy*, vol 30 N° 4 pp313 – 332.
- Ahmad, N. (2001) Agricultural Solar Air Collector Made from Low – Cost Plastic Packing Film, *Renewable Energy*, Vol. 23, pp. 663 – 671.
- Alexiades, V. y Solomon, A. (1993) *Mathematical Modelling of Melting or Freezing Processes*. Hemisphere Publishing Corporation, A Member of the Taylor & Francis Group.
- Battig, A.; Kalla, S.I.; Luccioni, R. (1972) Production of Heat in a Finite Circular Cylinder. *Revista de Física, Química e Ingeniería*, Vol IV, Serie A.
- Farid, M; Khudhair, A; Razack, S y Al-Hallaj, S. (2004) A Review on Phase Change Energy Storage: Materials and Applications. *Energy Conversion and Management* 45, 1597 – 1615.
- Grodzka, P. (1980) Phase Change Storage Systems. *Solar Energy Technology Handbook. Part A. Engineering Fundamentals*. Edited by W. Dickinson and P. Cheremisinoff, pp. 795 – 809.
- Hamdan, M.; Elwerr, F. (1996) Thermal Energy Storage Using A Phase Change Material. *Solar Energy*, Vol. 56, N° 2, pp. 183 – 189.
- Hasan, A y Saying, A. (1994) Some Fatty Acids as Phase Change Thermal Energy Storage Materials. *Renewable Energy*, Vol. 4, N° 1, pp. 69 – 76.
- Hinaba H, *Freezing Fractures in Water Pipes, Freezing and Melting Heat Transfer in Engineering*, Hemisphere, New York, pp.235-257, 1991.
- Hirata T, (1991) Ice-Band Structure on the Freezing of Flowing Water in Pipe, *Freezing and Melting Heat Transfer in Engineering*, Hemisphere, New York, pp.223-234.
- Lock G, (1991) On the Freeze Occlusion Water, *Freezing and Melting Heat Transfer in Engineering*, Hemisphere, New York, pp. 199-221.
- Lunardini, V. (1991) Conduction with Freezing and Thawing. *Freezing and Melting Heat Transfer in Engineering*, Chapter 3.
- Morales, M y Boucíguez, A (2007) Colectores Acumuladores Cilíndricos con Sustancias de Cambio de Fase. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. Vol.11, pág. 3.45 – 3.52.
- Sari. A y Kaygusuz, K. (2001) Thermal Performance of Myristic Acid as a Phase Change Material for Energy Storage Applications. *Renewable Energy*, Vol. 24, pp. 303 –317.
- Swern, D. (1964) *Bailey's Industrial Oil and Fat Products*. Interscience Publishers, a division of John Wiley & Sons. New York.
- Tunçbilek, K; Sari, A, Tarhan, S, Ergunes, G y Kaygusuz, K. (2005) Lauric and Palmitic Acids Eutectic Mixture as Latent Heat Storage Material for Low Temperature Heating Applications *Energy*, Vol. 30 pp. 677–692.
- Xiaomin Z; Zhengting W y Lifan S. (1994) Experimental Research for Heat Preservation of Freeze Pipe in the Swift Water Flow. *Ground Freezing 94"*, Proceeding Seventh International Symposium Ground Freezing/Nancy/France, A. A. Balkema, Rotterdam, pp.35-37.
- Zerroukat, M y Chatwin, C. *Computational Moving Boundary Problems*. John Wiley & Sons Inc.,1994.

ABSTRACT: The behavior of cylindrical containers as storage collectors in agricultural applications with organics phase change materials is presented here. The substance, initially solid at the melting point, is exposed at external temperatures greeter than the fusion one, by all its surfaces; then the fusion takes place in all directions. The obtained results show that these substances are adequate for these purposes and they allow conventional energy saving.

Key- words: phase change materials, cylindrical geometry, storage – collector, interface position.