

COLECTORES ACUMULADORES CILINDRICOS CON SUSTANCIAS DE CAMBIO DE FASE

Martín Morales y Angélica 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 presenta el comportamiento de colectores - acumuladores con sustancias de cambio de fase en geometría cilíndrica, los que podrán ubicarse en cualquier lugar del recinto a acondicionar e incluso moverse dentro del mismo. Se estudia el comportamiento de tales sustancias cuando se hallan expuestas a distintos flujos de calor. Los resultados obtenidos muestran que resultan aptas a estos fines y pueden contribuir al ahorro de energía convencional.

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

INTRODUCCION

La utilización de materiales de cambio de fase sólido – líquido en el acondicionamiento pasivo de locales ha sido propuesta por varios autores, (Grodzka, 1980; Tarzia, 1981/82) como colectores acumuladores que forman parte del propio lugar a acondicionar.

Sin embargo, en determinadas ocasiones tal como ocurre en un invernadero, una pileta para el cultivo de algas, es conveniente contar con el acondicionador dentro del recinto y con la posibilidad que pueda ubicarse en cualquier lugar y que absorba o entregue calor en forma simétrica por todo su lateral, para estos casos la geometría cilíndrica resulta ser la más adecuada. (Abhat, 1983; Ahmad, 2001; Battig et al, 1972)

La mayor parte de los problemas presentados en bibliografía se refieren a ductos en que la sustancia de trabajo es agua. (Cheng y Yen, 1991; Hirata, 1991; Hinaba, 1991; Lock, 1991; Lunardini, 1991; Xiaomin et al., 1994; Sasaguchi et al., 1997) Esta sustancia presenta serios problemas debido a la diferencia de densidades entre ambas fases (líquida y sólida) y su dilatación anómala, lo que puede llevar a la rotura de los contenedores, mientras que 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 sustancias orgánicas con un amplio rango de temperaturas de fusión (Farid et al., 2004; Laamberg, 2004; Tunçbilek et al., 2005) que pueden ser utilizadas para distintos fines, de acuerdo a la temperatura que se desee mantener el recinto; siendo éstas más adecuadas que las inorgánicas. (Hamdan y Elwerr, 1996; Hasan y Saying, 1994; Lock, 1991; Sari y Kaygusuz, 2001)

Por tanto es útil estudiar el comportamiento de tales sustancias, cuando se encuentran contenidas en recipientes de geometría cilíndrica, los que se encontrarán dentro del lugar a acondicionar. Dado que éstos transferirán calor en toda su superficie lateral, es deseable que su longitud sea significativamente mayor que su radio, por lo que, se analiza el problema considerando sólo la dimensión radial.

Cuando la fase inicial, sólida por ejemplo, se encuentra a la temperatura de fusión y la condición de borde es tal que el material se licua, el problema se dice a una fase, puesto que si bien ambas están físicamente presentes, la fase sólida permanece a la temperatura de fusión y no existe gradiente de temperatura en ella, entonces solo debe determinarse la distribución de temperaturas en la fase líquida y la posición de la interfase. Desde el punto de vista del acondicionamiento térmico ésta constituye la situación más desfavorable, por lo que si tales sustancias satisfacen los requerimientos para su utilización, en estas condiciones, lo satisfarán en el caso en que la temperatura inicial sea menor a la de fusión. (Boucíguez et al., 2006)

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 distintos flujos de calor por su superficie lateral.

FORMULACION DEL PROBLEMA

El problema resulta completamente descrito por la ecuación de difusión del calor en la fase líquida, sujeta a las correspondientes condiciones iniciales y de borde, más la del balance de energía en la interfase, (ecuación de Stefan) siendo

su posición variable en el tiempo, lo que constituye una incógnita adicional del problema, denominada frontera libre. (Alexiades y Solomon, 1993) Dichas ecuaciones son:

$$\frac{\partial T(r,t)}{\partial t} = \alpha \frac{1}{r} \frac{\partial(rT(r,t))}{\partial r} \quad 0 < t < \tau, R_1 < x < s_1(t), s_2(t) < x < R_2 \quad (1)$$

$$\frac{\partial s(t)}{\partial t} = -\left(\frac{k}{\rho L}\right) \cdot \frac{\partial T(s(t),t)}{\partial r} \quad \forall t > 0 \quad (2)$$

$$s_1(0) = R_1 \quad (3)$$

$$s_2(0) = R_2 \quad (4)$$

$$T(r,0) = T_f \quad (5)$$

$$T(s_1(t),t) = T(s_2(t),t) = T_f \quad (6)$$

$$-k \cdot \frac{\partial T(R_1,t)}{\partial r} = q_1(t) \quad \forall t > 0 \quad (7)$$

$$-k \cdot \frac{\partial T(R_2,t)}{\partial r} = q_2(t) \quad \forall t > 0 \quad (8)$$

Donde $T(r,t)$ representa el perfil de temperaturas en función de la coordenada radial r y la temporal t ; $s(t)$ la posición de la frontera libre, que separa el líquido del sólido, $q(t)$ el flujo de calor que ingresa a la sustancia. Asimismo, k , ρ , C y L son respectivamente, la conductividad térmica, densidad, calor específico y calor latente de fusión, y $\alpha = k/(\rho C)$ es la difusividad térmica de la sustancia. El radio R_2 es igual a 0.20m y el R_1 es igual a 0.01m, si es una cavidad o es nulo si se trata de un cilindro macizo. La ecuación (1) es la de difusión, la (2) la de Stefan, la (3), (4) y (5) son las condiciones iniciales y las (6), (7) y (8) dan las condiciones de borde.

RESOLUCIÓN NUMERICA

En la Figura 1 se presenta un esquema del recipiente cilíndrico, visto de frente y desde arriba, que contiene la sustancia de cambio de fase, donde se señalan con flechas el flujo de calor que ingresa a través de la pared exterior de radio R_2 y de la interior de radio R_1 .

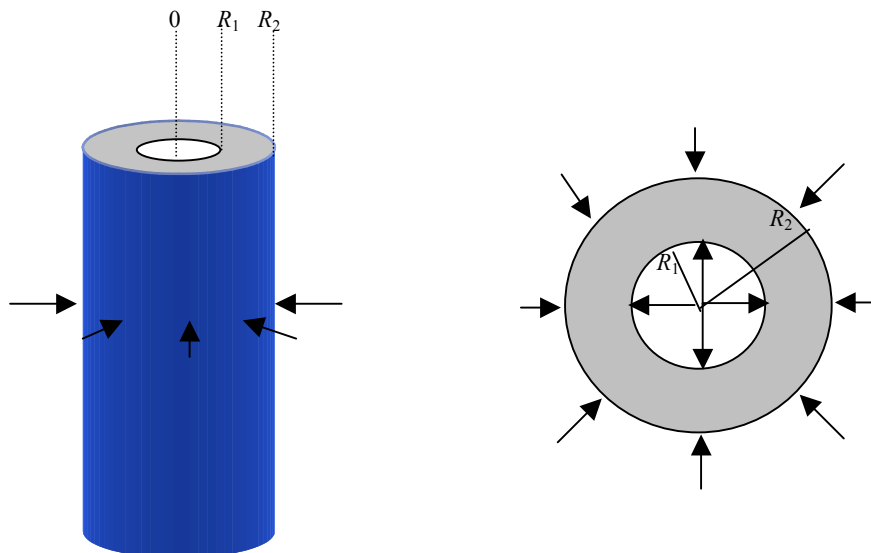


Figura 1: Esquema del recipiente cilíndrico de radios interior R_1 y exterior R_2

A los efectos de llevar a cabo el cálculo se han tomado los valores de los parámetros térmicos que corresponden a grasas orgánicas (Swern, 1964, Hasan y Sayigh, 1994) $k=0.15\text{W/m K}$, $\rho=778\text{ kg/m}^3$, $L=213\text{ kJ/kg}$, $c=2384\text{ J/ kg K}$

La resolución numérica se ha realizado mediante un modelo de diferencias finitas explícitas, en Matlab, que permite obtener simultáneamente la posición de la interfase y la distribución de temperatura en el interior del material de cambio de fase. Se analizaron los casos de un cilindro de radio R_2 (en este caso $R_1=0$) que recibe calor desde el exterior y de una cavidad cilíndrica de radio exterior R_2 e interior R_1 , que recibe calor tanto desde el exterior como del interior de la cavidad.

Para el cilindro de radio R_2 , se consideraron flujos señalados en la Tabla 1, donde también se especifica el código con que se designó cada uno de ellos. Uno de ellos es constante y el otro crece linealmente desde 100 hasta 300 W/m^2 en 24 horas.

Flujo constante	qcte (W/m^2)	$q(t) = 300$
Flujo lineal	qlineal (W/m^2)	$q(t) = 0.0023 \cdot t + 100$

Tabla 1: Distintos flujos estudiados en el caso de un cilindro de radio R_2 , con material de cambio de fase..

Para la cavidad de radio exterior R_2 e interior R_1 se analizaron los flujos detallados en la Tabla 2.

Flujo lineal en R_1 (W/m^2)	$q_1(t) = 0.0023 \cdot t + 100$	Flujo constante en R_2 (W/m^2)	$q_2(t) = 300$
Flujo constante en R_1 (W/m^2)	$q_1(t) = 300$	Flujo lineal en R_2 (W/m^2)	$q_2(t) = 0.0023 \cdot t + 100$

Tabla 2: Distintos flujos estudiados en el caso de una cavidad cilíndrica de radio exterior R_2 e interior R_1

Los valores elegidos para los flujos corresponden a la cantidad de calor que podría almacenarse en tales recipientes si estuvieran ubicados en el interior de un invernadero entre las plantas, se ha tomado un valor constante de referencia, mientras que el que aumenta linealmente en el tiempo lo hace desde 100 hasta 300 W/m^2 .

RESULTADOS OBTENIDOS

Se presentan gráficamente los resultados obtenidos para los distintos casos analizados: posición de la frontera en función del tiempo y distribución de la temperatura en el material de cambio de fase, en la que su variación está representada en colores que varían de acuerdo a su magnitud, las temperaturas más altas están en rojo y las más bajas en azul. Obsérvese que el flujo varía linealmente en el tiempo, no así la distribución de temperaturas ni el avance de la interfase, pero a los efectos de designar el tipo de flujo se hablará de flujo constante si éste no varía en el tiempo o de flujo lineal si este aumenta linealmente según se explicita en las Tablas 1 y 2.

En la Figura 2 se presenta la posición de la interfase en función del tiempo, para cada una de las condiciones de borde señaladas cuando el material de cambio de fase se almacena en un cilindro de radio R_2 . Se observa que en todos los casos la posición de la frontera avanza hacia el interior del cilindro, alcanzando en el caso de flujo constante los 9.4 cm y en el lineal los 12.7 cm, ambos medidos desde el centro del cilindro.

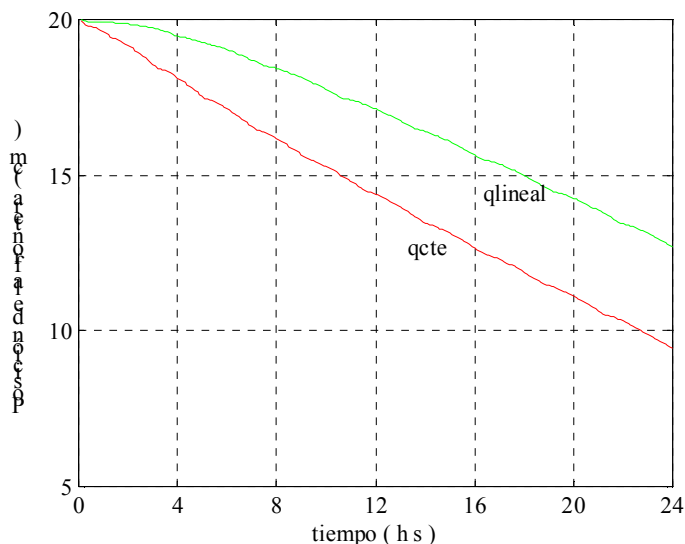


Figura 2: Posición de la frontera para cada uno de los flujos estudiados en el caso de un cilindro de radio R_2

En la Figura 3 se presentan la distribución de temperaturas en el interior del material de cambio de fase, como una imagen en color en función de la posición y del tiempo; para los flujos presentado en la Tabla 1. En ella se señala también el valor máximo de la temperatura que corresponde al color rojo y el mínimo que corresponde al color azul, este último coincide con el valor de la temperatura de fusión, esto es igual a 10 $^{\circ}C$.

En la misma figura se observa que el flujo constante produce una mayor temperatura que el que crece linealmente, en acuerdo con el avance de la frontera que se muestra en la Figura 2. Esto se explica teniendo en cuenta la cantidad de energía que

recibe el material de cambio de fase, es mayor en el flujo constante que en el que crece linealmente, ya que este último parte de 100 W/m^2 y recién alcanza los 300 W/m^2 al cabo de 24 horas.

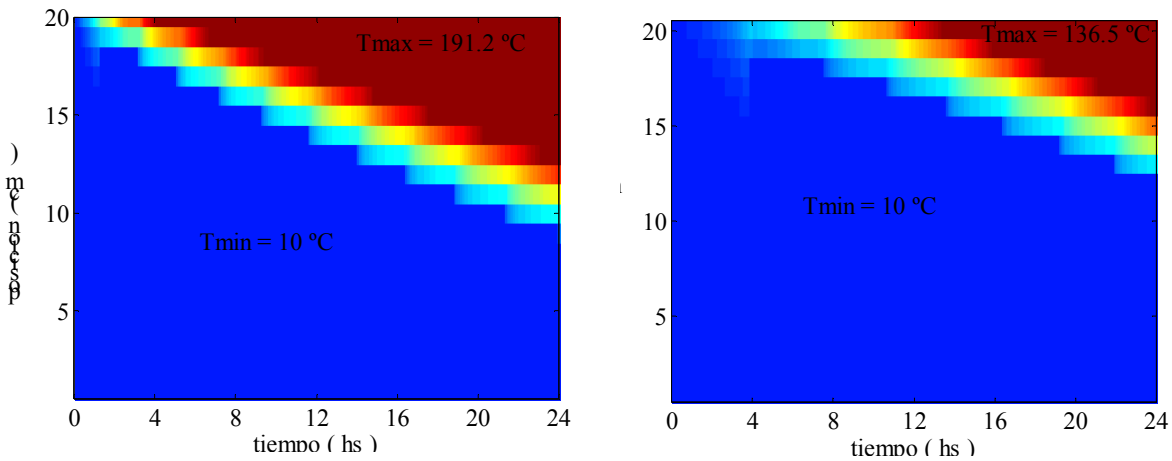


Figura 3: Temperaturas para el flujo constante (izquierda) y lineal (derecha) en función del tiempo.

En la Figura 4 se muestran las temperaturas en función de la posición para ambos flujos a las 6, 12, 18 y 24 horas de iniciado el cálculo.

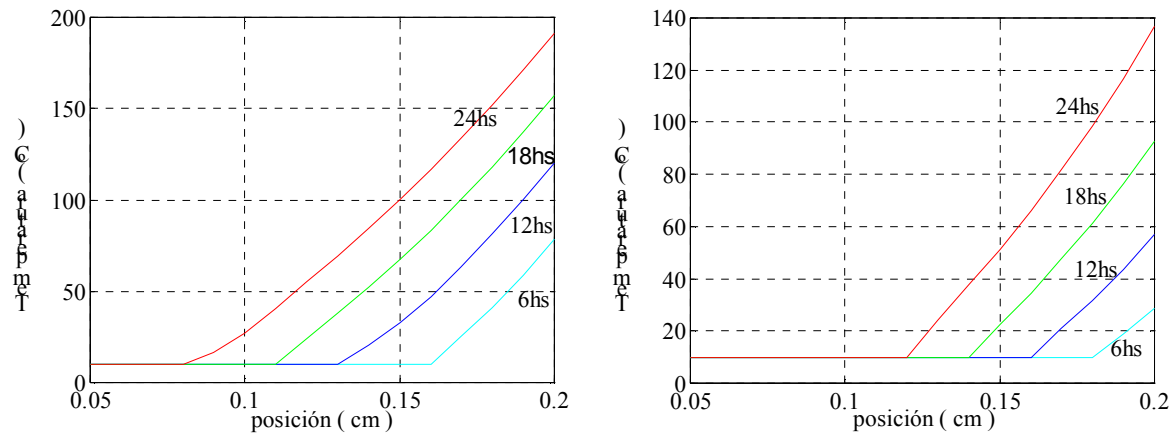
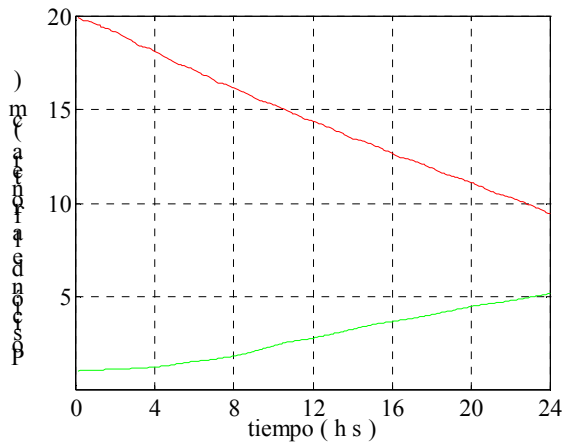


Figura 4: Temperaturas para el flujo constante (izquierda) y lineal (derecha) a $t=6, 12, 18$ y 24 hs .

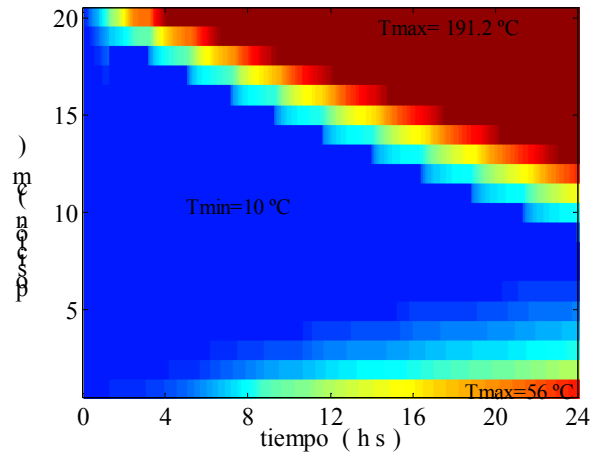
En las Figuras 5 y 6 se presentan los resultados obtenidos para la cavidad cilíndrica sometida a las condiciones señaladas en la Tabla 2. En ellas, se muestra el avance de las fronteras en función del tiempo, paralelamente a la distribución de las temperaturas alcanzadas por la sustancia de cambio de fase, obsérvese que las condiciones de borde están intercambiadas entre ambos radios de la cavidad. Se presenta también la temperatura en función de la posición a las 6, 12, 18 y 24 horas para cada una de las condiciones analizadas.

En la Figura 5 se presenta las posiciones de la frontera y la distribución de temperaturas en el interior de la sustancia de cambio de fase cuando ella se encuentra expuesta a un flujo lineal en R_1 y constante en R_2 . Las posiciones alcanzadas por las dos fronteras son: $s_1=5.16 \text{ cm}$ y $s_2=9.45 \text{ cm}$, siendo las temperaturas máximas alcanzadas de 56 °C y 191.2 °C respectivamente. La Figura 5 a muestra las posiciones de ambas interfases, la 5 b la distribución de temperaturas en función del tiempo y la 5 c, la temperatura en función de la posición a las 6, 12, 18 y 24 horas.

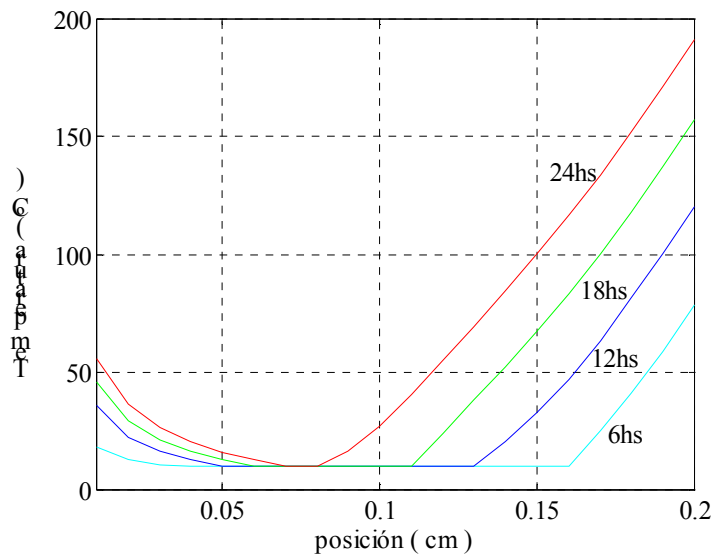
En ellas se observa que para los flujos de calor analizados las fronteras no llegan a juntarse, lo que significa que el material se encuentra sólido en el interior de la cavidad a la temperatura de fusión; tal como se aprecia en la imagen de la temperatura en función de la posición y del tiempo, donde el centro de color azul representa al valor mínimo, correspondiente a la temperatura de fusión. Asimismo se aprecia las posiciones de ambas fronteras por la distribución de colores que van desde el rojo (líquido a mayor temperatura) hasta el azul. Esto también se aprecia en la Figura 5 c, donde el interior de la cavidad se encuentra a la temperatura de fusión, dado por las líneas horizontales a los 10 °C .



(a) posición de las fronteras



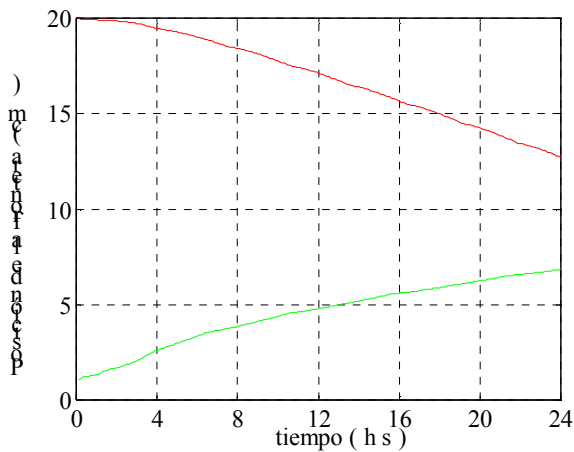
(b) mapeo de las temperaturas



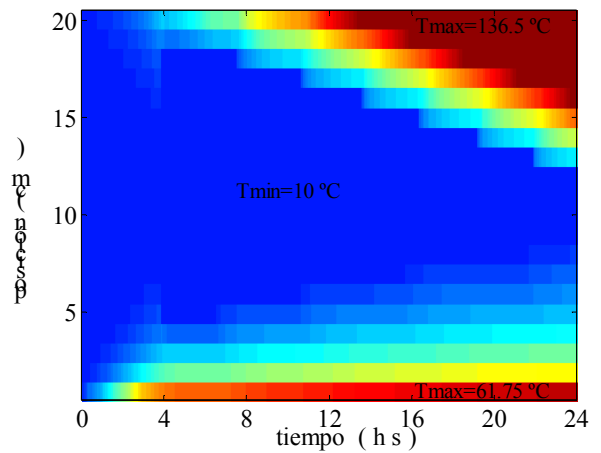
(c) temperaturas a las 6, 12, 18 y 24 hs.

Figura 5: Posición de las fronteras y temperaturas para un flujo lineal en R_1 y constante en R_2

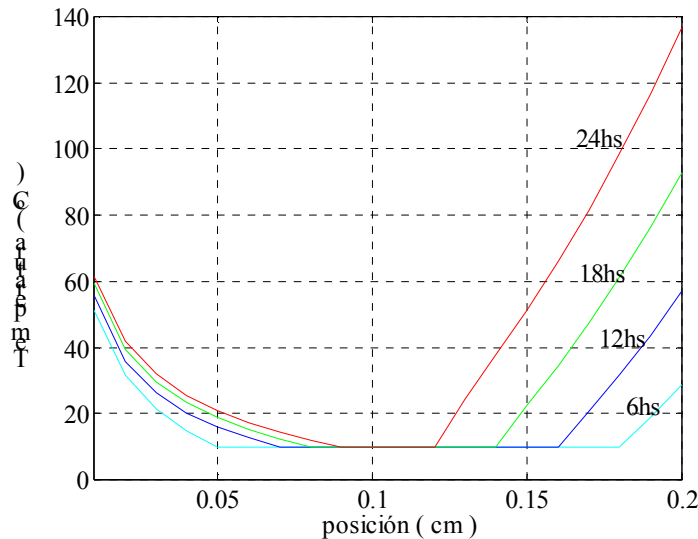
En la Figura 6 se presenta las posiciones de la frontera y la distribución de temperaturas en el interior de la sustancia de cambio de fase cuando se intercambian las condiciones de borde, esto es, la sustancia se encuentra sometida a un flujo de calor constante en su radio interior R_1 y a uno lineal en su radio exterior R_2 . Las posiciones alcanzadas por las dos fronteras son: $s_1=6.84$ cm y $s_2=12.71$ cm, mientras que las temperaturas máximas alcanzadas son respectivamente 61.75 °C y 136.5 °C.



(a) posición de las fronteras



(b) mapeo de las temperaturas



(c) temperaturas a las 6, 12, 18 y 24 hs.

Figura 6: Posición de la frontera y mapeo de temperaturas para flujo constante en R_1 y lineal en R_2

En ella se observa también que para los flujos de calor analizados las fronteras no llegan a juntarse, lo que significa que el material no se ha fundido completamente; al igual que en el caso anterior, el sólido en el interior se encuentra a la temperatura de fusión, tal como se aprecia en el color azul en el mapeo de las temperaturas. Esta situación también se refleja en las temperaturas en función de la posición, alcanzadas por la sustancia de cambio de fase al cabo de 6, 12, 18 y 24 horas.

Comparando los resultados presentados en el caso del cilindro y de la cavidad (Figuras 2 a 6) se observa cuando el radio exterior R_2 , está sujeto a la misma condición de borde el avance de la frontera y la distribución de temperaturas en dicho borde coinciden, independientemente de que el cilindro sea macizo o hueco.

Comparando los resultados obtenidos en el caso de la cavidad se observa que al intercambiar las condiciones de contorno entre el radio interior R_1 y el exterior R_2 el avance de la frontera y la distribución de temperaturas son distintos, es decir no se intercambian entre sí, tal como sucede en el caso de una geometría rectangular. (Boucíguez et al., 2006) Esto es así porque los radios son distintos y por lo tanto el flujo de calor avanza en distinta forma, ya que la influencia del radio se encuentra directamente en la ecuación de difusión. [ver ec. (1)] Esta es una característica de la geometría cilíndrica que no se presenta en la rectangular. Este hecho, se observa también en la imagen de la temperatura como función de la posición y del tiempo.

En efecto, cuando un flujo de calor de 300 W/m^2 , actúa sobre la superficie de radio $R_2=20\text{cm}$, entrega una potencia de 377 W , mientras que si el mismo flujo actúa sobre la superficie interior de radio $R_1=1\text{cm}$, entrega una potencia de 18.8 W . Este cálculo corrobora los valores obtenidos y comprueba que no tiene la misma consecuencia sobre el material de cambio de fase un flujo de determinado valor, importa también en que superficie esté aplicado.

También se aprecia que en todas las figuras, la posición de la frontera, coincide con el punto (posición radial y temporal) en que la temperatura toma el color azul en el mapeo de la misma y con las temperaturas en función de la posición cada 6 horas. Esto corrobora que desde un determinado radio (R_1 ó R_2) hasta la respectiva frontera (s_1 ó s_2) el material se encuentra líquido, existiendo un gradiente de temperatura desde el borde hasta la posición de la frontera. Entre ambas fronteras la sustancia se encuentra sólida a la temperatura de fusión.

Es de hacer notar que los cálculos se han hecho para 24 horas, período que excede en principio el tiempo que el material de cambio estaría expuesto a la fuente de calor. A la mitad del periodo, es decir a las 12 horas, la posición de la frontera y las temperaturas máximas alcanzadas por el material de cambio de fase, permiten aseverar que dichas sustancias pueden utilizarse como energía auxiliar. Estos resultados se resumen en la Tabla 3.

Flujo en R_1	$T(R_1, 12 \text{ hs})$	$s_1(12 \text{ hs})$	Flujo en R_2	$T(R_2, 12 \text{ hs})$	$s_2(12 \text{ hs})$
lineal	$35.7 \text{ }^\circ\text{C}$	2.7 cm	constante	$56.9 \text{ }^\circ\text{C}$	4.8 cm
constante	$120.4 \text{ }^\circ\text{C}$	14 cm	lineal	$55.9 \text{ }^\circ\text{C}$	17 cm

Tabla 3: Temperaturas y posición de la frontera para los dos flujos que actúan desde distintos laterales.

CONCLUSIONES

El modelo de simulación numérica puede utilizarse para el cálculo de cualquier situación, que presente geometría cilíndrica, con condiciones de borde de flujo de calor, sean éstas constantes o variables, así como también adiabáticas; permiten

determinar y visualizar rápidamente la posición de la frontera y el perfil de temperaturas en el interior del material de cambio de fase, en cualquier instante de tiempo.

La utilización de materiales de cambio de fase, contribuye a disminuir el peso y el volumen de los colectores acumuladores, respecto de aquellos construidos con materiales tradicionales de construcción; lo cual es importante cuando se tiene necesidad de moverlos dentro de un recinto, debiendo ocupar el menor volumen posible a fin de no afectar el espacio disponible para la operación que se realice en él: cultivo, secado, almacenamiento, etc.

Los resultados obtenidos muestran que estos materiales pueden aportar la energía auxiliar necesaria para el mantenimiento de las condiciones de temperaturas deseables en el recinto a acondicionar. Si fuera necesario almacenar una cantidad mayor de energía, deberán aumentarse los flujos de calor que se entregan a las sustancias de cambio de fase, pero al poder moverse el recipiente que las contiene éstas pueden ubicarse en cualquier lugar del recinto o incluso fuera de él y luego ser llevadas a su interior en el momento de utilizarlos como moderadores de temperatura.

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.
- Bouciguez, A. Lozano, R. Sánchez, A. y Lara, M. (2006) Conservación de Productos Agrícolas Utilizando Sustancias de Cambio de Fase. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Revista de la Asociación Argentina de Energía Solar* Vol.10, Pág. 2.23 – 2.30.
- Bouciguez, A. González, J y Lara, M. (2006) Comportamiento de una Pared de Cambio de Fase Sujeta a Condiciones Externas por Ambos Laterales. *Energías Renovables y Medio Ambiente. Revista de la Asociación Argentina de Energía Solar*. Vol.18, pág. 51 – 57
- Cheng K. y Yen Y. (1991) Historical and Recent Developments in Research of Cold Regions Heat Transfer - Ice in Air, Water and Earth, *Freezing and Melting Heat Transfer in Engineering*, Hemisphere, New York, pp.17-62.
- 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. Chermisinoff, 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.
- Laamberg, P; Lehtiniemi, R; Henell, A. (2004) Numerical and Experimental Investigation of Melting and Freezing Processes in Phase Change Material Storage, *International Journal of Thermal Sciences*, 43, 277 – 287.
- 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.
- 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.
- Sasaguchi K; Kusano K; Kitagawa H y Kuwabara K. (1997) Effect of Density Inversion on Cooling of Water Around a Cylinder in a Rectangular Cavity. *Numerical Heat Transfer, Part A*, 32, pp.131-148.
- Swern, D. (1964) *Bailey's Industrial Oil and Fat Products*. Interscience Publishers, a division of John Wiley & Sons. New York.
- Tarzia, D. (1981/82) Una Revisión sobre Problemas de Frontera Móvil y Libre para la Ecuación del Calor. *El problema de Stefan. Mathematicae Notae*. Año XXIX, pp 147 – 214.
- 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.

CYLINDRICAL STORAGE – COLLECTOR WITH PHASE CHANGE MATERIALS

ABSTRACT: The performance of cylindrical storage collectors using phase change materials is presented here. They can be located in any place of the local to be conditioned and can be moved inside it. Several fluxes of heat, constant and variable, are analyzed. The obtained results show that such substances are useful for these purposes and they allow conventional energy saving.

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