

ACONDICIONAMIENTO TERMICO CON SUSTANCIAS DE CAMBIO DE FASE COMO MODERADORAS DE TEMPERATURA EN RECINTOS AGRICOLAS.

A. Boucíguez¹, M. A. Lara², M. Vilte¹

¹Facultad de Ciencias Exactas. Universidad Nacional de Salta. Av. Bolivia 5150 – Salta, Argentina.
Tel 0387 –4255424. e-mail: bouciga@unsa.edu.ar, viltem@unsa.edu.ar

²Instituto de Física Rosario (IFIR – UNR – CONICET) Facultad de Ciencias Agrarias. (UNR). Av. Pellegrini 250, Rosario.
Tel. 0341-495467 int. 33, – Fax 0261-4287370 – e-mail: mlara@ifir.edu.ar

RESUMEN: Se estudia el comportamiento de sustancias de cambio de fase como moderadoras de temperatura en el acondicionamiento térmico de recintos agrícolas. La sustancia se encuentra inicialmente sólida a la temperatura menor a la de fusión y al ser sometida a condiciones externas de temperatura ambiente mayor a ésta y/o flujo de calor, se produce un aumento en su temperatura y su posterior fusión. Los resultados obtenidos muestran que resultan aptas a estos fines y constituyen un ahorro significativo de energía convencional.

Palabras claves: cambio de fase, problema de Stefan, recintos agrícolas, temperatura de fusión, interfase.

INTRODUCCION

Diversos autores han propuesto la utilización de sustancias de cambio de fase, como colectores - acumuladores, principalmente en locales destinados a viviendas o centros sanitarios, (Grodzka, 1980; Farid et al., 2004) cuyas paredes forman parte del propio recinto a acondicionar. Se ha demostrado también que las sustancias orgánicas resultan más adecuadas que las inorgánicas debido a que no presentan problemas de sub-enfriamiento y soportan mayor cantidad de ciclos de fusión – solidificación, sin sufrir alteraciones significativas en sus parámetros térmicos. (Hamdan y Elwerr, 1996; Hasan y Saying, 1994; Lock, 1991; Sari y Kaygusuz, 2001; Tunçbilek et al., 2005)

En este trabajo se plantea la utilización de tales sustancias como moderadoras de temperatura en recintos destinados al almacenamiento y transporte de productos agrícolas. La sustancia de cambio de fase deberá absorber el calor proveniente del exterior o del propio local a acondicionar; para ello deberá encontrarse inicialmente sólida a temperatura menor o igual a la de fusión.

En trabajos anteriores se ha presentado la situación en que la sustancia se encuentra sólida a la temperatura de fusión, (Lozano et al., 2003; Lozano y Boucíguez, 2004; Boucíguez et al., 2006) licuándose por el ingreso de calor. En este trabajo se presenta el caso en que la sustancia se encuentra inicialmente a temperatura menor a la de fusión, por lo que por el ingreso de calor aumentará su temperatura y luego se producirá la fusión. Este problema se conoce en literatura como de Stefan a dos fases, dado que existe un gradiente de temperatura en cada fase: la sólida existente y la líquida emergente, las que se encuentran separadas por una interfase que se mueve en el tiempo de acuerdo a una ley desconocida a priori, por lo que debe determinarse conjuntamente con la distribución de temperaturas en ambas fases. Este tipo de frontera recibe el nombre de libre, para distinguirla de aquella que aún siendo móvil se desplaza según una ley conocida. (Alexiades y Solomon, 1993)

Los productos agrícolas, mantienen activo su metabolismo aún después de haber sido separados de la planta, por lo que generan calor, denominado tasa de respiración, el que si no es controlado lleva a la pérdida del producto. Asimismo, el lugar destinado al almacenamiento también puede estar expuesto a condiciones de temperatura adversas para el adecuado mantenimiento del producto que en él se encuentra.

Un esquema del recinto a acondicionar con la pared de cambio de fase se muestra en la Figura 1, las dimensiones de ésta no deben ser significativas, de modo de no quitar espacio al lugar destinado al producto agrícola y con ello aumentar costos, por lo que se propone que éste no supere los 20 cm.

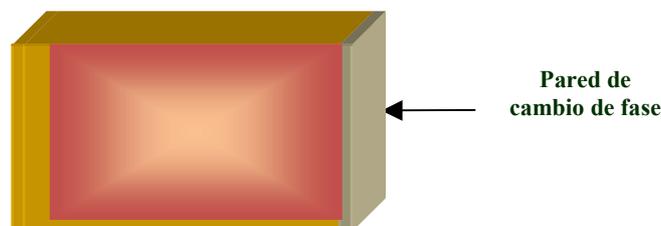


Figura 1: Esquema del recinto a acondicionar y la pared de cambio de fase.

PLANTEO DEL PROBLEMA Y FORMULACION MATEMATICA

El problema a resolver es el denominado de Stefan a dos fases, el cual resulta completamente descrito por las ecuaciones de difusión en ambas fases: sólida y líquida y la que expresa el balance de energía en la interfase, conocida como de Stefan, las que deberán satisfacer las respectivas condiciones iniciales y de contorno. Se considera que el material de cambio de fase tiene un espesor a , el que podrá ser finito o infinito. Si se designa con $T(x,t)$ a la temperatura, función de la posición x y el tiempo t , con T_f a la temperatura de fusión, con $T(t)$ a la temperatura externa y con $q(t)$ al flujo de calor al que se encuentra sometido la sustancia y con $s_1(t)$ y $s_2(t)$ las posiciones de las fronteras libres provenientes de cada lateral, el problema resulta completamente descrito por las ecuaciones (1) a (7)/(7') para el caso finito. En el caso semi - infinito existirá solo la frontera $s_1(t)$, proveniente del lateral $x=0$; la condición sobre la frontera $s_2(t)$, desaparece y la correspondiente condición de borde en $x=a=\infty$ es $T(a=\infty,t)=T_0$.

$$\frac{\partial T^l}{\partial t} = \alpha_l \frac{\partial^2 T^l}{\partial x^2} \quad 0 < t < \tau, \quad \begin{matrix} 0 < x < s_1(t) \\ s_2(t) < x < a \end{matrix} \quad (1)$$

$$\frac{\partial T^s}{\partial t} = \alpha_s \frac{\partial^2 T^s}{\partial x^2} \quad 0 < t < \tau, \quad s_1(t) < x < s_2 \quad (2)$$

$$T^l(s_1(t),t) = T^s(s_1(t),t) = T^s(s_2(t),t) = T^l(s_2(t),t) = T_f \quad \forall t > 0 \quad (3)$$

$$\rho L \frac{ds_1(t)}{dt} = -k_l \frac{\partial T^l(x=s_1(t)^-)}{\partial x} + k_s \frac{\partial T^s(x=s_1(t)^+)}{\partial x} \quad \forall t > 0 \quad (4)$$

$$\rho L \frac{ds_2(t)}{dt} = k_l \frac{\partial T^l(x=s_2(t)^+)}{\partial x} - k_s \frac{\partial T^s(x=s_2(t)^-)}{\partial x} \quad \forall t > 0 \quad (4')$$

$$T(x,0) = T_0(x) < T_f \quad 0 < x \leq a \quad (5)$$

$$s_1(0) = 0, \quad s_2(0) = a \quad (6)$$

$$T(0,t) = T(t) > T_f, \quad T(a,t) = T(t) > T_f, \quad \forall t > 0 \quad (7)$$

$$-k_l \frac{\partial T^l(0,t)}{\partial x} = \dot{q}_1(t), \quad -k_l \frac{\partial T^l(a,t)}{\partial x} = \dot{q}_2(t), \quad \forall t > 0 \quad (7')$$

En estas ecuaciones las letras “l” y “s” utilizadas como sub o supra índices, denotan respectivamente líquido y sólido. Los parámetros térmicos de la sustancia son: calor específico c , densidad ρ , conductividad térmica k , calor latente de fusión L y difusividad térmica $\alpha=k/(\rho c)$. En la ecuación (4)/(4') se ha señalado con ρ a la densidad, sin hacer distinción entre sólido y líquido. En rigor, las densidades en ambas fases son distintas, por tratarse precisamente de un problema de cambio de fase. (Sear y Salinger, 1978) Sin embargo, para las sustancias orgánicas, esta diferencia no es grande y a los efectos del cálculo puede tomarse como la correspondiente a cualquiera de las dos fases o a un promedio entre ambas. De hecho tomar distintos valores de densidades dificulta la resolución del problema sin aportar un grado de precisión significativo en los resultados. En la mayor parte de los materiales la diferencia de densidades no supera el 5% y $\rho_l < \rho_s$, así el volumen ocupado por el líquido es mayor que el ocupado por la misma masa de sólido. (Alexiades y Solomon, 1993; Lock, 1996)

Este problema solo presenta solución analítica cuando es semi – infinito y la condición de borde en $x=0$ es de temperatura constante o de flujo de calor inversamente proporcional a la raíz cuadrada del tiempo. (Alexiades y Solomon, 1993) Cabe destacar que ambas situaciones expresan el mismo problema físico, esto es un flujo de calor inversamente proporcional a la raíz cuadrada del tiempo implica que la temperatura en el borde se mantiene constante y recíprocamente, esta situación permite además validar los modelos de simulación con los valores conocidos que arroja la solución exacta. (Boucíguez et al. 2007)

A los efectos del cálculo se han tomado valores de las propiedades térmicas, que corresponden a valores típicos de las grasas orgánicas: $\rho=800 \text{ kg/m}^3$; $L=120000 \text{ J/Kg}$; $k_l=0.220 \text{ W/m}^2 \text{ K}$; $k_s=0.180 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ $c_l=1600 \text{ J/Kg K}$; y $c_s=1400 \text{ J/Kg K}$. (Swern, 1964)

RESULTADOS OBTENIDOS

Sin pérdida de generalidad puede tomarse que la temperatura de fusión es $T_f=0 \text{ }^\circ\text{C}$, y por ende, la temperatura $T(x,t)$ obtenida del cálculo denota cuanto se ha elevado la temperatura por encima de la de fusión. Esto da una mayor generalidad al cálculo, puesto que los valores obtenidos no quedan vinculados a una temperatura de fusión particular. Por ello, en este trabajo se ha tomado $T_f=0 \text{ }^\circ\text{C}$ y la temperatura inicial en $-5 \text{ }^\circ\text{C}$.

Se ha analizado el caso en que el material de cambio de fase sea semi – infinito, lo que podría corresponder a que uno de los laterales se encuentra aislado térmicamente y por tanto solo recibe el calor proveniente del producto agrícola que se desea acondicionar. Cuando el espesor es finito, el material de cambio de fase se encuentra expuesto no solo al producto agrícola sino también a las condiciones ambientales externas y su espesor no supera los 20 cm.

Podría pensarse que cuando la sustancia de cambio de fase pasa al estado líquido, existe movimiento del fluido, dando lugar a procesos convectivos. Dadas las dimensiones involucradas, al analizar el caso unidimensional, este efecto no se ha considerado y por ende se estudia el problema de transferencia de calor por conducción, tal como lo expresan diversos autores (Bettencourt et al, 1981; Tarzia, 1984; Lock, 1996; Alexiades y Solomon, 1993; Zerroukat y Chatwin, 1994)

El proceso de fusión se produce en forma paulatina de modo que existe una porción líquida con un gradiente de temperatura, comprendido entre la del borde y la de fusión, una interfase líquido – sólido a la temperatura de fusión y una porción de sólido con un gradiente de temperatura entre la de fusión y la inicial, si el material es semi – infinito, o entre la de fusión y una temperatura que se encuentra entre ésta y la inicial en el caso de tratarse de un material finito.

Se estudia también las situaciones en que la excitación externa proviene de una fuente a temperatura mayor que la de fusión o de un flujo de calor, los que se detallan en la Tabla 1, conjuntamente con el simbolismo utilizado para representarlas en las figuras correspondientes. Tales situaciones pueden producirse cuando la sustancia de cambio de fase es sometida a condiciones de flujo de calor proveniente del producto o del exterior. Los valores considerados son razonables pensando en condiciones ambientales y en el calor generado por los productos agrícolas. (Murray et al., 2000)

Condición en el borde fijo	Simbología
$q(0,t)=20 \text{ W/m}^2$	q20
$q(0,t)=40 \text{ W/m}^2$	q40
$q(0,t)=20 (1 + t/48) \text{ W/m}^2$ (t en horas)	qcre
$T(0,t)=5 \text{ }^\circ\text{C}$	T5
$T(0,t)=20 \text{ }^\circ\text{C}$	T20
$T(0,t)=20 [1 + \text{sen}(\pi t/12)] \text{ }^\circ\text{C}$ (t en horas)	Tosc

Tabla 1. Condiciones de borde utilizadas para el cálculo.

Los resultados obtenidos para el caso semi – infinito se muestran en las Figuras 2 a 4. En la Figura 2 se presenta la posición de la interfase en función del tiempo para todas las condiciones de borde analizadas, en ella se observa que en todos los casos la posición de la frontera avanza en el tiempo, resulta interesante el caso en que la temperatura oscila, en él la interfase se mantiene en un valor constante mientras la temperatura en el borde se encuentra cerca del mínimo, el que se alcanza a las 18 horas. El tiempo total de cálculo fue de 48 horas, debido a que éste debe ser el tiempo máximo destinado al almacenamiento o al transporte de los productos agrícolas.

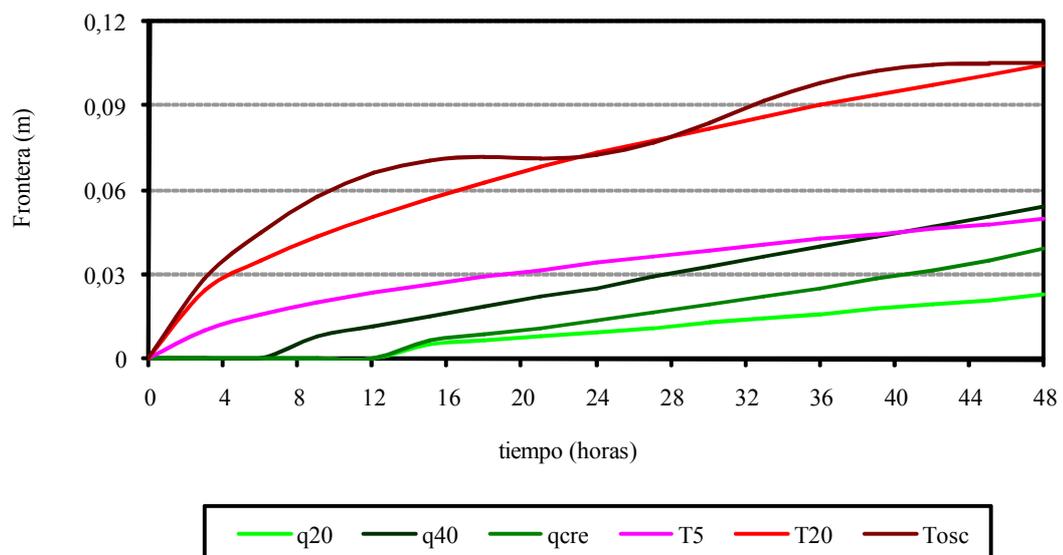


Figura 2. Posición de la interfase para el caso semi – infinito.

En las Figuras 3 y 4 se presenta la distribución de temperaturas en ambas fases cuando ha transcurrido un tiempo de 36 y 48 horas respectivamente. Se ha considerado el espesor del material de cambio de fase necesario para que la temperatura en el sólido llegue a la condición inicial (-5°C), los colores utilizados para ellas son coincidentes con los utilizados en la Figura 2 para cada situación evaluada.

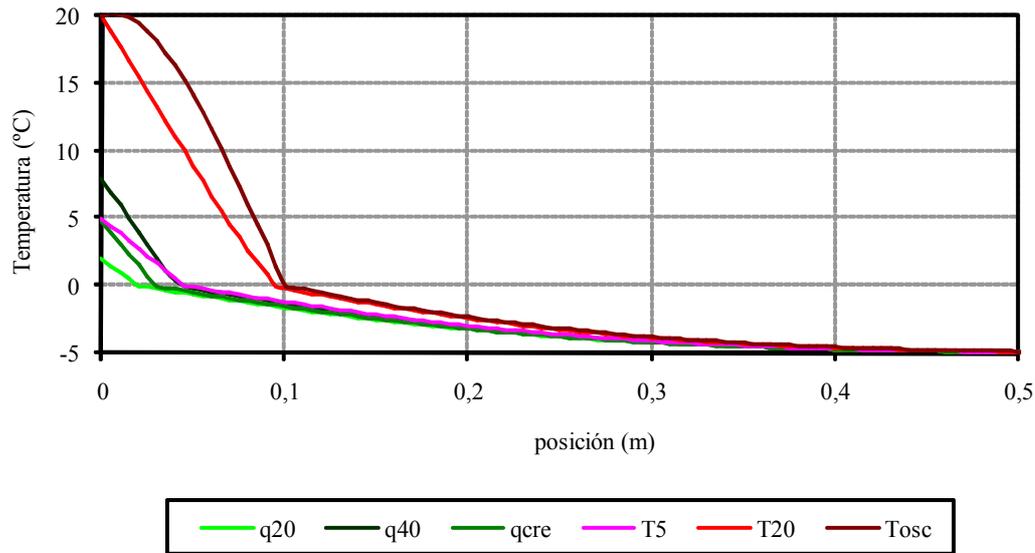


Figura 3: Distribución de temperaturas para el caso semi – infinito, al cabo de 36 horas.

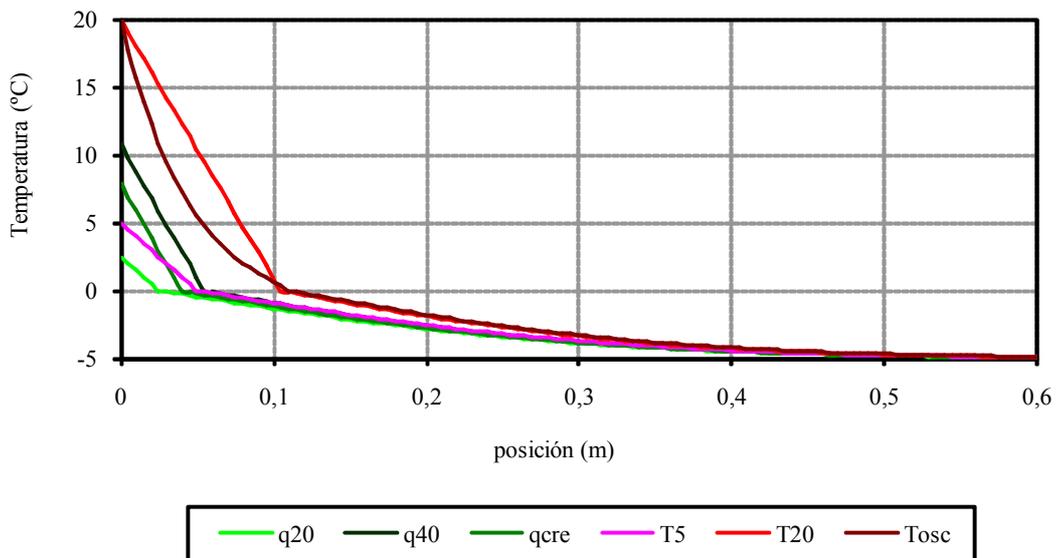


Figura 4: Distribución de temperaturas para el problema semi – infinito, al cabo de 48 horas.

En las Figuras 3 y 4 se observa también que la intersección de las curvas con el eje horizontal correspondiente al valor de $T=0^{\circ}\text{C}$, coincide con la posición de la interfase para el tiempo considerado; en este punto el cambio en la pendiente de la curva de temperatura, indica que si bien la temperatura es continua no lo es su derivada espacial, tal como lo expresa la ecuación de Stefan. (ec. 4)

Es de hacer notar que si bien los espesores representados son grandes en virtud de la utilización de tales sustancias en el acondicionamiento térmico de locales, se ha priorizado el hecho de señalar el punto en que la temperatura en el sólido coincide con la de fusión, sin embargo puede verse que a los 20 cm, la sustancia no se ha fundido completamente, en ninguno de los casos presentados. También se observa que las posiciones de las fronteras en los casos analizadas se encuentran en el siguiente orden: q20, qcre, T5, q40, T20 y Tosc.

Las condiciones reales de operación es que la pared de cambio de fase tenga un espesor finito, estando por tanto sometida a dos condiciones de borde, una por cada lateral: así está expuesta a la temperatura externa por uno de sus laterales, ($x=0$) y recibe el flujo de calor proveniente del producto agrícola por el opuesto, ($x=a=0.2\text{m}$). Considerando todas las situaciones analizadas en el caso semi – infinito, existen nueve combinaciones posibles, de ellas tres corresponden a los casos extremos (menor y mayor avance de la frontera) y uno intermedio; éstas de menor a mayor son: $T(0,t)=5^{\circ}\text{C}$ y $q(0.2,t)=20\text{W/m}^2$; $T(0,t)=20^{\circ}\text{C}$ y $q(0.2,t)=20(1+t/48)\text{W/m}^2$ y $T(0,t)=20[1+\text{sen}(\pi t/12)]^{\circ}\text{C}$ y $q(0.2,t)=40\text{W/m}^2$; denotados respectivamente con:

(T5-q20); (T20-qcre) y (Tosc-q40). Los resultados obtenidos para las posiciones de la frontera se muestran en la Figuras 5, en ella se observa que en ningún caso la sustancia se funde completamente al cabo de 48 horas.

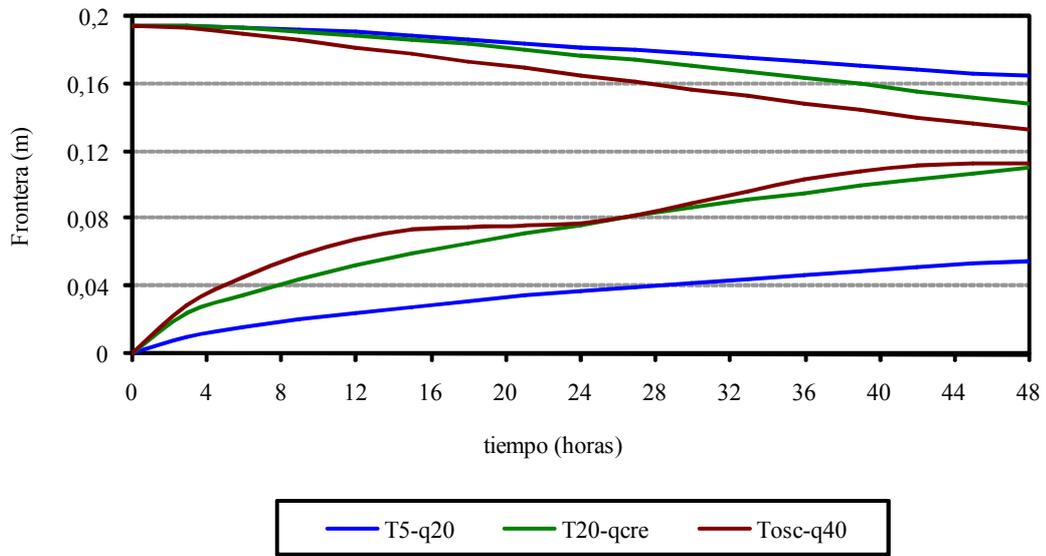


Figura 5: Posición de las interfases para la pared finita.

Es útil considerar también las temperaturas alcanzadas por el material de cambio de fase, fundamentalmente en la pared en contacto con el producto agrícola, ($x=a=0.2m$) ya que ella no debe superar la máxima temperatura que éste puede soportar para su correcta conservación. Estos valores, se presentan en la Tabla 2, para 24, 36 y 48 horas de exposición a las condiciones de flujo de calor antedichas.

Condición de borde	T5-q20	T20-qcre	Tosc-q40
T(0.2,24) (°C)	1.50	3.00	3.00
T(0.2,36) (°C)	2.50	5.87	5.91
T(0.2,48) (°C)	3.20	9.33	9.37

Tabla 2: Temperaturas en la pared en contacto con el producto agrícola.

Se observa que para al cabo de 48 horas, la temperatura de la pared en contacto con el producto agrícola no supera los 10 °C, situación que se produce en el flujo creciente y en el constante e igual a 40 W/m². Dependiendo del producto que se trate podrá o no ser aceptable esta temperatura; de resultar alta deberá almacenarse por un tiempo menor o utilizar energía auxiliar para refrigerar. Se observa también que para cualquiera de los flujos analizados el producto agrícola puede conservarse sin problemas durante un día, ya que la temperatura en la pared que colinda con él no ha superado los 3 °C, por encima de la de fusión de la sustancia de cambio de fase.

CONCLUSIONES

El modelo numérico presentado, resulta confiable ya que ha sido validado con anterioridad frente a situaciones cuya solución analítica es conocida; es totalmente versátil y puede trabajarse con cualquier flujo de calor y temperatura. Por tanto permite hacer rápidamente un análisis de factibilidad del acondicionamiento térmico planteado.

Las sustancias de cambio de fase resultan una alternativa interesante para el acondicionamiento térmico de productos agrícolas, dependiendo el tiempo de acondicionamiento de cada producto particular y de las condiciones ambientales a las que se encuentre expuesto.

Dado que el interior del material de cambio de fase permanece sólido, se observa que el espesor de 20 cm sugerido es adecuado y hasta podría ser menor, por lo que constituye una alternativa perfectamente viable.

Dado que usualmente se utiliza energía eléctrica para mantener las temperaturas adecuadas para la conservación de los productos agrícolas, esta alternativa permite el ahorro de energía, ya sea porque no es necesaria su utilización o porque disminuye la cantidad requerida.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo se desarrolló 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

- Alexiades, V.; Solomon, A., 1993, *Mathematical Modeling of Melting or Freezing Processes*, Hemisphere Publishing Corporation, A Member of the Taylor & Francis Group.
- Bettencourt, J; Zienkiewicz, O y Cantin, G. (1981) *International Journal Numerical Methods Engineering*. Vol. 17 pág 931 – 938.
- 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. Lozano, R y Lara, M. (2007) *About the Exact Solution in Two Phase Stefan Problem. Revista Engenharia Térmica (RETERM)*. ABCM. En evaluación.
- Farid, M, Khudhair, A, Razack, S y Al-Hallaj, S., (2004) *A Review on Phase Change Energy Storage: Materials y Applications* Energy Conversion y Management N° 45, pp. 1597-1615.
- Grodzka, F. *Phase Change Storage Systems*. Cap. 25. *Solar Energy Technology Handbook*. Part A. Engineering Fundamentals. Edited by W. Dickinson and P. Cheremisinoff, 1980.
- Hamdan, M.; Elwerr, F. (1996) *Thermal Energy Storage Using A Phase Change Material*. *Solar Energy*, Vol. 56, N° 2, pág. 183 – 189.
- Hasan, A y Saying, A. (1994) *Some Fatty Acids as Phase Change Thermal Energy Storage Materials*. *Renewable Energy*, Vol. 4, N° 1, pág. 69 – 76.
- Lock G, (1991) *On the Freeze Occlusion Water, Freezing and Melting Heat Transfer in Engineering*, Hemisphere, New York, pág. 199-221.
- Lozano, R. Bouciguez, A. Lara, M y Villa, L. (2003) *Comportamiento de la Frontera Libre en Materiales de Cambio de Fase con Condiciones de Flujo de Calor Constante. Energías Renovables y Medio Ambiente. Revista de la Asociación Argentina de Energía Solar*. Vol. 12, pág. 49 – 53.
- Lozano, R y Bouciguez, A. (2004) *Comportamiento Térmico de una Sustancia de Cambio de Fase con Condición de Temperatura en el Borde Fijo. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Revista de la Asociación Argentina de Energía Solar*. Vol. 8, N° 2, pág. 08.61 – 08.66.
- Murray, R. Budde, C y Lucangeli, C. (2000) *Los Secretos del Buen Frío*. *Revista Super Campo*, Año VII N° 74, pp.22 – 25.
- Sari. A y Kaygusuz, K. (2001) *Thermal Performance of Myristic Acid as a Phase Change Material for Energy Storage Applications*. *Renewable Energy*, Vol. 24, pág. 303 –317.
- Sear F, y Salinger, G. (1978) *Termodinámica, Teoría Cinética y Termodinámica Estadística*, Editorial Reverté, S. A. España.
- Swern, D. (1964) *Bailey's Industrial Oil and Fat Products*. Interscience Publishers, a division of John Wiley & Sons. New York.
- Tarzia, D. (1984) *Seminario sobre Problemas de Stefan y sus Aplicaciones*. Cuaderno N° 11. Instituto de Matemática “Beppo Levi”, Universidad Nacional de Rosario.
- 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 pág. 677–692.
- Zerroukat, M y Chatwin, C. *Computational Moving Boundary Problems*. John Wiley & Sons Inc.,1994.

ABSTRACT: The behavior of organic materials as temperature moderates for thermal conditioning in the agricultural products storage places during phase change is presented in this study. These materials are initially solid at temperature lower than their melting point. By exposure to greater external temperature and/or heat flux, their fusion takes place. The results obtained show that these materials prove to be adequate temperature moderators and they can save an important amount of conventional energy.

Key words: phase change, Stefan problem, agricultural products storage places, interface position.