

COMPORTAMIENTO DE SUSTANCIAS ORGÁNICAS DE CAMBIO DE FASE EXCITADAS CON LA MISMA ENERGÍA.

Ricardo F. Lozano,^a Angélica C. Boucíguez^a y Miguel A. Lara^b

^aFacultad de Ciencias Exactas. Universidad Nacional de Salta. Av. Bolivia 5150. Salta. Argentina
Tel: 0387-4255424 - Fax: 0.387 – 4255489 lozanor@unsa.edu.ar bouciga@unsa.edu.ar

^bInstituto de Física Rosario (CONICET)-Facultad de Ciencias Agrarias.(UNR)
Av. Pellegrini 250. Rosario. Tel: 0341 – 495467 int 33 malara@fceia.unr.edu.ar

Palabras Clave: Cambio de fase, problema de Stefan, flujo de calor, sustancias orgánicas.

Resumen: En el presente trabajo se estudia el comportamiento de sustancias orgánicas de cambio de fase sometidas a distintos flujos de calor durante un cierto período de tiempo, con la premisa de que la energía total recibida por la sustancia sea la misma en todos los casos. El estado inicial es sustancia sólida a la temperatura de fusión, la que por el ingreso de calor, va tornándose líquida a la vez que aparece una frontera que separa dicha fase de la sólida ya existente. La posición de esta frontera y la distribución de temperaturas en el líquido constituyen las incógnitas del problema a resolver. Los resultados muestran que, al cabo de 12 horas, la posición de la interfase sólido - líquido (para cada flujo) se encuentra entre 38 y 44mm, mientras que la temperatura en el borde que recibe calor está entre 6 y 29°C. Esto pone de manifiesto que tanto la posición de la interfase, como la distribución de temperaturas dependen de la energía total recibida y de la forma en que ésta es entregada, lo que debe ser tenido en cuenta a la hora de realizar el diseño constructivo.

1-INTRODUCCIÓN

La utilización de sustancias de cambio de fase, de origen orgánico e inorgánico, como acumuladores y reguladores de temperatura de locales destinados a distintos fines, ha sido estudiada por diversos autores. (Grodzka,1980; Swet, 1981; Ghoneim, et al 1991; Hamdan y Elwerr, 1996; Lock, 1996; Stritih, 2003; Farid et al, 2004, Tyagi y Buddhi, 2007)

En particular, las sustancias orgánicas presentan características que las hacen más apropiadas para su utilización, al ser más estables, no presentar problemas de subenfriamiento ni problemas de corrosión. (Swern, 1964; Hasan y Sayigh, 1994; Feldman, 1995; Laamberg, et al. 2004)

En este ámbito se ha pensado su utilización como moderadores controladores de temperatura en recintos destinados al almacenamiento y transporte de productos agrícolas. (González y Boucíguez, 2005; Boucíguez et al. 2006b, a) Dado que formarán parte de las paredes del recinto (ya sea al ser construidos especialmente o al adosarse a los ya existentes) su espesor no debe ser significativo, por lo que se ha propuesto que no supere los 20cm, (Medina et al.2004) ya que un valor mayor tornaría inviable el acondicionamiento por razones constructivas y económicas.

Con tal propósito, se ha estudiado su comportamiento cuando se hallan sujetos a diversas condiciones ambientales, tal como el ingreso de una cierta cantidad de calor. En particular, es interesante observar el comportamiento del material de cambio de fase, frente a distintos flujos de calor, que actuando durante un cierto tiempo, entregan la misma cantidad de energía. Cada flujo actúa durante un tiempo de 12 horas, ($\tau=12\text{hs}$) a partir de este tiempo cae a cero.

Los flujos de calor analizados son:

- Un flujo parabólico con pico de 150W/m^2 , a la mitad del período, el que puede asimilarse a la radiación en un día con nubosidad uniforme.
- El flujo que da solución exacta (inversamente proporcional a la raíz cuadrada del tiempo), que puede pensarse como el generado por el propio producto a acondicionar.
- Un flujo constante que puede provenir de una fuente de calor externa.
- Un flujo lineal creciente (desde cero hasta su máximo valor a las 12 horas), que puede deberse a un incremento en la temperatura.
- Un flujo decreciente (desde el máximo valor hasta cero al cabo de 12 horas), que correspondería a un descenso en la temperatura externa.

La energía entregada $E(t)$ por el flujo parabólico al cabo de 12 horas es de 4320 kJ/m^2 y considerando que ésta debe ser la misma para cada uno de los flujos propuestos se ha calculado las expresiones numéricas de los mismos, las que se explicitan en la Tabla 1.

Tipo de flujo	Ecuación que lo representa $[t]=\text{seg}; [q]=\text{W/m}^2$
Parabólico	$q_1 = 150 - 150[(t - 21600)/21600]^2$
Exacto	$q_2 = 10392,3/\sqrt{t}$
Constante	$q_3 = 100$
Creciente	$q_4 = 0.00463 \cdot t$
Decreciente	$q_5 = 200 - 0.00463 \cdot t$

Tabla 1: Flujos considerados en el cálculo.

II FORMULACION MATEMATICA

Se ha considerado que la sustancia de cambio de fase se encuentra inicialmente sólida a la temperatura de fusión, lo que se denomina problema de Stefan a una fase, dado que el sólido

se mantendrá a dicha temperatura, por lo que solo es necesario evaluar la temperatura en el líquido y la posición de la interfase en función del tiempo.

Las ecuaciones involucradas son las de transferencia de calor en el líquido, ya que la fase sólida permanece a la temperatura de fusión, sujeta a las correspondientes condiciones iniciales y de borde; además de la ecuación de Stefan que da el balance de energía en la interfase. (Zerroukat y Chatwin, 1994; Alexiades y Solomon, 1996)

Los parámetros de la sustancia de cambio de fase utilizados para el cálculo son los típicos de las grasas orgánicas (Swern, 1994): conductividad térmica $k=0.22\text{W/m }^\circ\text{C}$; calor específico $c=1600\text{J/kg }^\circ\text{C}$; densidad $\rho=800\text{kg/m}^3$ y calor latente de fusión $L=120\text{kJ/kg}$.

De tal modo que el problema queda completamente descrito por las ecuaciones (1) a (6), donde $\alpha=k/(\rho c)$ es la difusividad térmica del material y con $u(x,t)$ se ha designado la diferencia de temperatura entre la alcanzada por el material de cambio de fase y la de fusión.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, \quad t > 0 \quad 0 < x < s(t) \leq e \quad (1)$$

$$u(s(t), t) = 0, \quad \forall t > 0 \quad (2)$$

$$\rho L \frac{ds(t)}{dt} = -k \frac{\partial u(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=s(t)} \quad \forall t > 0 \quad (3)$$

$$u(x, 0) = 0, \quad 0 < x \leq e \quad (4)$$

$$s(0) = 0 \quad (5)$$

$$q(t) = -k \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{(0,t)} \quad q(t) \geq 0, \quad \forall t > 0 \quad (6)$$

Es de hacer notar que no se especifica la condición de contorno en $x=e$, esto es así debido a que por tratarse de un problema a una fase, se puede resolver separadamente desde cada lateral y luego superponer las soluciones (González, 2006) que avanzan desde cada lateral. En este caso particular se ha estudiado el comportamiento de la sustancia de cambio de fase, al estar sometida a distintos flujos de calor, que ingresan desde el borde $x=0$.

Puede demostrarse que si $u(x,t)$ y $s(t)$ son soluciones de las ecuaciones (1) a (6), entonces la condición de Stefan (ec. 3) es equivalente a la siguiente condición integral: (ecuación 7) (Tarzia, 1984)

$$s(t) = \frac{E(t)}{\rho L} - \frac{c}{L} \int_0^{s(t)} u(x, t) dx \quad \text{con} \quad E(t) = \int_0^t q(z) dz \quad (7)$$

Además puede probarse que cualquier solución $u(x,t)$ del problema(1) a (6) es no negativa, por lo que $E(t)/\rho L$, establece una cota superior a los valores alcanzados por la frontera para los distintos flujos.

De éstos solo se conoce la solución analítica para el denominado exacto, por lo que la resolución numérica del mismo permite asegurar la bondad del modelo de cálculo. Los otros flujos deben resolverse numéricamente, para ello se ha empleado un esquema de diferencias finitas implícitas, que sigue los pasos planteados por Nochetto (1984).

Los cálculos se han realizado utilizando el lenguaje de programación *Mathematica* (Wolfram, 1999) Se ha designado con Δx a la distancia entre dos nodos consecutivos en el

espacio y con Δt al incremento temporal. El índice i se utiliza para el espacio y el j para el tiempo. Llamando $N(j)$ a la parte entera de $(s(j)/dx)$, el problema discreto consiste en hallar la $N(j)+1$ temperaturas $u(i,j+1)$ y la posición de la frontera $s(j+1)$ en el instante $(j+1)$, tal como se expresa en la ecuación (8)

$$\alpha \frac{(u(i-1, j+1) - 2u(i, j+1) + u(i+1, j+1)))}{(\Delta x)^2} = \frac{(u(i, j+1) - u(i, j))}{\Delta t} \quad (8)$$

Esta última ecuación es la discretización de la ecuación de difusión en diferencias finitas implícitas, que expresa las temperaturas en los nodos interiores. ($1 \leq i \leq N(j) - 1$). En la proximidad de la frontera libre $s(t)$ la discretización conduce a la ecuación (9)

$$\frac{u[N(j), j+1] - u[N(j), j]}{\Delta t} = \left(\frac{2\alpha}{\Delta x} \right) \cdot \left(\frac{u[N(j)-1, j+1]}{s(j+1) - (N(j)-1)\Delta x} - \frac{u[N(j), j+1]}{s(j+1) - N(j)\Delta x} \right) \quad (9)$$

Esta última ecuación resulta de discretizar la ecuación diferencial (1) cuando los puntos pivotaes no están uniformemente espaciados y se supone un comportamiento cuadrático de $u(x,t)$ en la proximidad de $s(j+1)$, donde la temperatura $u(x,t)=0$, tal como lo expresa la ecuación (2). En el borde fijo la discretización conduce a:

$$q(j+1) = -k \frac{u(1, j+1) - u(0, j+1)}{\Delta x} \quad (10)$$

La discretización de la ecuación (7) resulta:

$$s(j+1) = \frac{E(j+1)}{\rho L} - \frac{c}{L} \Delta x \sum_{i=1}^{N(j)-1} u(i, j+1) - \frac{1}{2} [s(j+1) - (N(j)-1)\Delta x] \cdot u(N(j), j+1) \quad (11)$$

Con las ecuaciones (8) a (11) se realiza un proceso iterativo que resuelve el sistema lineal (8) a (10) a partir de un valor inicial dado para $s(j+1)$ y luego se calcula nuevamente $s(j+1)$ utilizando la ecuación (11), hasta que el valor de $s(j+1)$ no cambie. Para este cálculo se utiliza la función *Fixed Point*, disponible en el *Math* (Wolfram, 1999) De esta forma la malla se modifica agregando un o más nodos si se verifica que $(N(j)+1) \Delta x < s(j+1)$.

El método de Nochetto no puede extenderse a problemas multidimensionales, se basa en la ecuación (7) que implica cierta regularidad de $s(t)$, en particular que sea creciente, situación que se verifica en la gran mayoría de problemas de frontera libre y en éste en particular.

III RESULTADOS OBTENIDOS

En la Figura 1 se muestra la posición de la frontera líquido - sólido en función del tiempo hasta luego de transcurridas tres horas del corte de la excitación, con el fin de hacer notar que la frontera no retrocede, sino que continúa creciendo o permanece constante como consecuencia del calor acumulado en el material de cambio de fase. En ella se observa que, los valores alcanzados a las 12 horas, se encuentran entre 38 y 44mm. (ver Tabla 2), lo que concuerda con lo establecido por Sherman (1971), quien ha determinado los límites entre los cuales debe encontrarse la posición de la interfase, dados por la ecuación (12). En ningún caso dicha posición supera los 4,5cm lo que demuestra que los 20cm de espesor del material de

cambio de fase, son suficientes para acondicionar el producto agrícola, aún por un tiempo mayor.

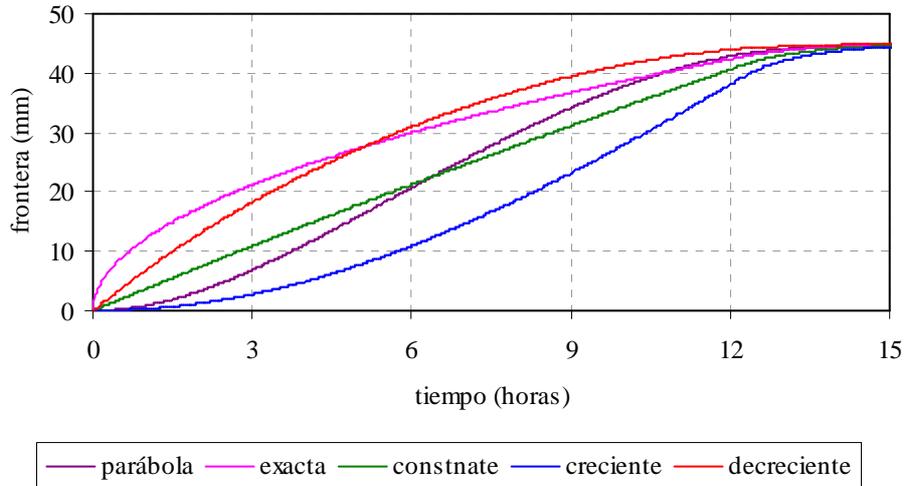


Figura 1: Posición de la interfase para los distintos flujos.

$$\left[1 + \left\| q(t) \right\| \frac{c}{kL} \sqrt{\frac{\alpha \tau}{\pi}} \right]^{-1} \frac{E(\tau)}{\rho L} \leq s(t) \leq \frac{E(\tau)}{\rho L} \quad (12)$$

La temperatura alcanzada por el material de cambio de fase es sustancialmente distinta de un flujo a otro. La Figura 2 muestra la temperatura en función del tiempo en la pared que recibe el calor para cada uno de los flujos considerados, en ella se ha mantenido el mismo color que el utilizado para representar la posición de la frontera.

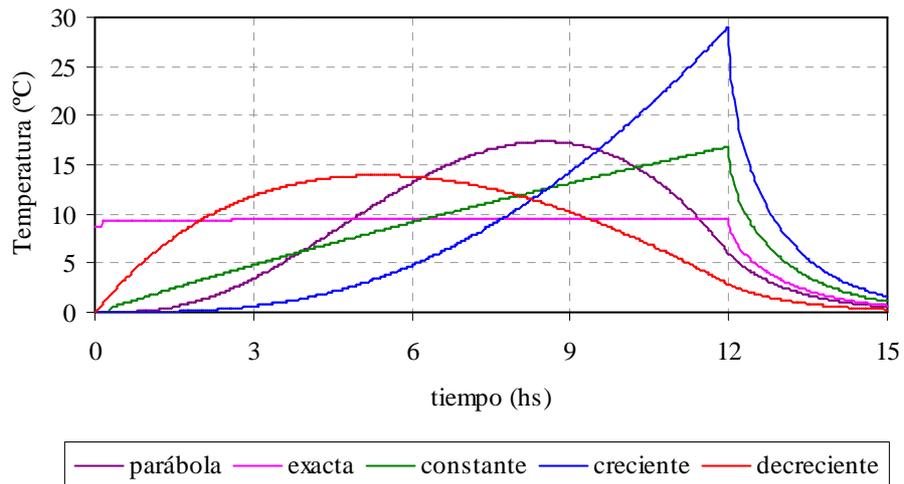


Figura 2: Temperaturas en la pared que recibe el flujo de calor

En todos los casos se observa que la temperatura cae a partir de las 12 horas, lo cual es consistente con el hecho de que haya desaparecido la excitación. La temperatura correspondiente al flujo exacto es constante, tal como lo expresa la solución analítica del problema. (Alexiades y Solomon, 1996) En los demás flujos la temperatura varía según la

forma en que se entrega el calor, así en el flujo parabólico y el decreciente presenta un máximo para luego descender, mientras que en los flujos constantes y creciente la temperatura aumenta mientras la excitación esté presente. En la Tabla 2 se resumen los resultados de la posición de la frontera, las temperaturas al cabo de las 12 horas de trabajo y los máximos alcanzados, conjuntamente con la hora en que éstos se produjeron.

Tipo de flujo	Frontera (mm)	Temperatura (°C)	Tmáx/tiempo
parabólico	42,87	5,97	17,35°C / 8,5hs
exacto	42,36	9,44	9,44°C / $\forall t$
constante	40,62	16,87	16,87°C / 12hs
creciente	38,13	29,06	29,06°C / 12hs
decreciente	43,95	2,83	13,94°C / 5,4hs

Tabla 2: Posición de la frontera, temperaturas alcanzadas y tiempo n que se producen los máximos.

También puede verse en la Figura 2 y la Tabla 2 que el máximo valor para el flujo parabólico se presenta dos horas y media después de que éste alcanza su valor máximo, debido a que el material de cambio de fase absorbe el calor y desfasa la onda térmica. La temperatura en el borde, para el flujo decreciente presenta un máximo luego de casi cinco horas y media de haber comenzado la excitación, como consecuencia de que el material de cambio de fase acumula calor a medida que le es entregado pero al ir éste disminuyendo, disminuye también la temperatura de la zona en contacto con la fuente. Para los casos de flujo constante y creciente, el valor máximo en la temperatura se alcanza al cabo de doce horas, es decir aumenta mientras la excitación está presente. El caso del flujo exacto, como ya se ha señalado, equivale a una temperatura constante en la pared en contacto con él, ésta es también una condición para la que el problema presenta solución analítica. (Boucíguez et al. 2006)

Es interesante observar también la distribución de temperaturas en el interior de la sustancia de cambio de fase, para cada uno de los flujos presentados. En las figuras 3 a 7 se presentan la distribución de temperaturas en función del tiempo para los distintos flujos en el borde en contacto con el flujo y a 2,5, 5, 10, 20 y 25 mm del mismo, también hasta las 15 horas. La temperatura máxima en cada caso se encuentra en el borde, lo que está de acuerdo con el principio del máximo.

La Figura 3 presenta la distribución de temperaturas para el flujo parabólico, en ella se observa que las temperaturas en el interior siguen a la alcanzada en borde, con los máximos desfasados en el tiempo, producto de la acumulación en el material de cambio de fase.

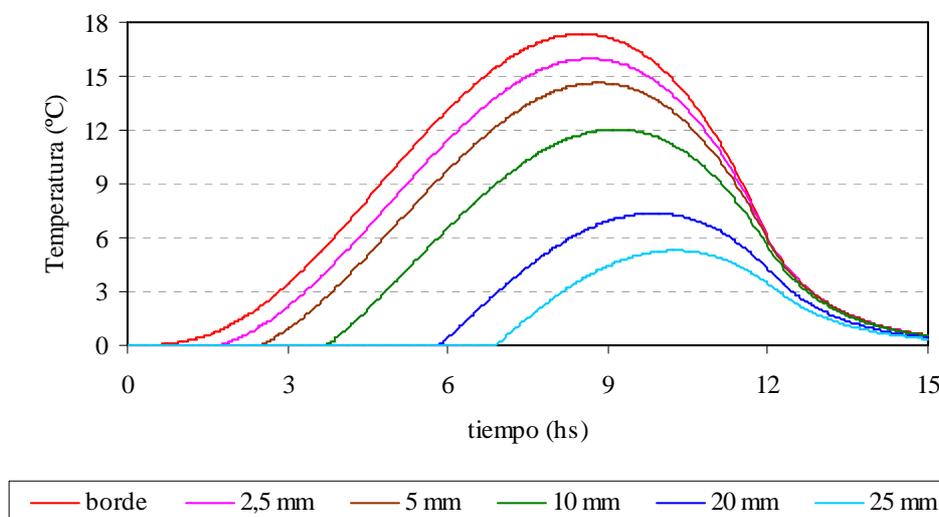


Figura 3: Distribución de temperaturas en el interior de la sustancia para el flujo parabólico.

En la figura 4 se presenta la distribución de temperaturas para el flujo exacto, en ella se observa que las temperaturas en el interior siguen a la del borde.

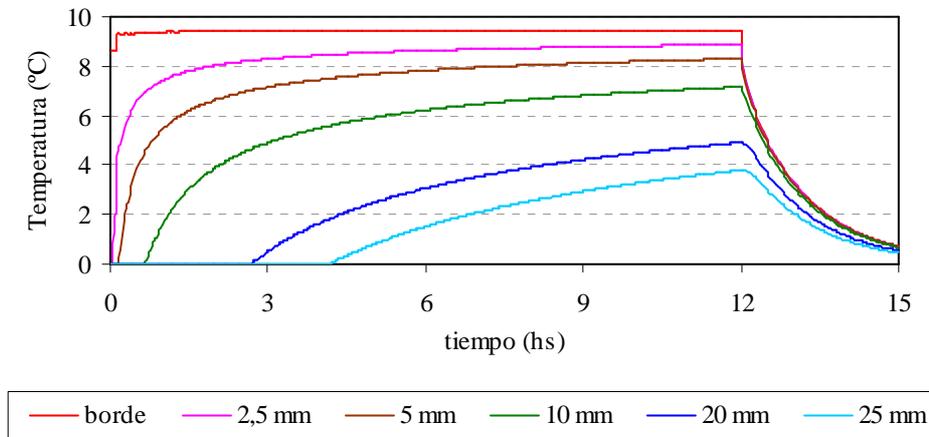


Figura 4: Distribución de temperaturas en el interior de la sustancia para el flujo exacto.

La Figura 5 muestra la distribución de temperaturas para el flujo constante, en ella se observa que las temperaturas en el interior siguen a la alcanzada en borde, creciendo en forma lineal y alcanzando el valor máximo al final del tiempo que dura la excitación.

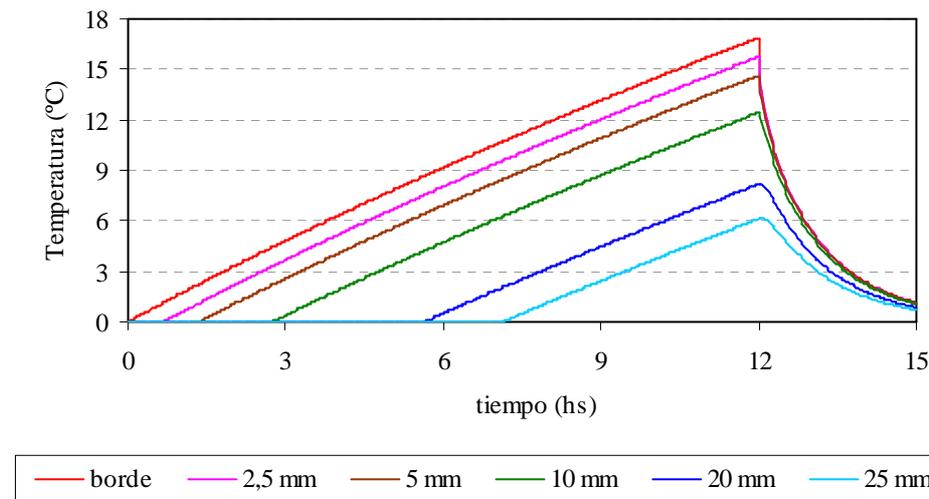


Figura 5: Distribución de temperaturas en el interior de la sustancia para el flujo constante.

La Figura 6 muestra la distribución de temperaturas para el flujo creciente, en ella al igual que en el flujo constante, se observa que las temperaturas en el interior aumentan al igual que lo hace la del borde hasta alcanzar el valor máximo al final del tiempo que dura la excitación. Se observa también que este flujo es el que da valores mayores de temperatura.

En la Figura 7 se presenta la distribución de temperaturas para el flujo decreciente, en ella en forma similar a lo que ocurre en el flujo parabólico, se observa que las temperaturas en el interior aumentan hasta un determinado valor, alcanzando un máximo luego de unas 5 horas de iniciada la excitación; en el interior las temperaturas mantienen esta tendencia con un corrimiento temporal en la posición de los máximos, debido a la capacidad del material de cambio de fase para acumular el calor que recibe. La presencia de un máximo se debe a que

en las primeras horas el material recibe el calor necesario para aumentar su temperatura pero luego, al disminuir el flujo, éste no le es suficiente para mantenerla y por tanto disminuye.

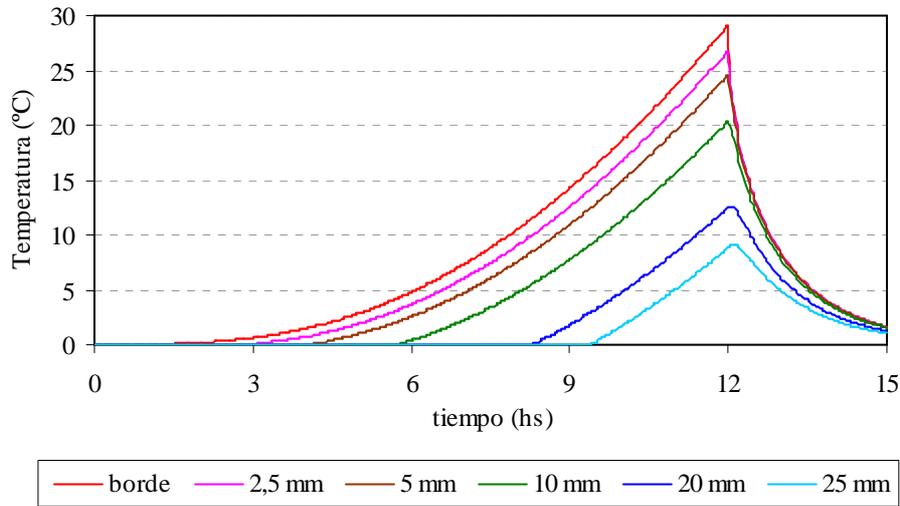


Figura 6: Distribución de temperaturas en el interior de la sustancia para el flujo creciente.

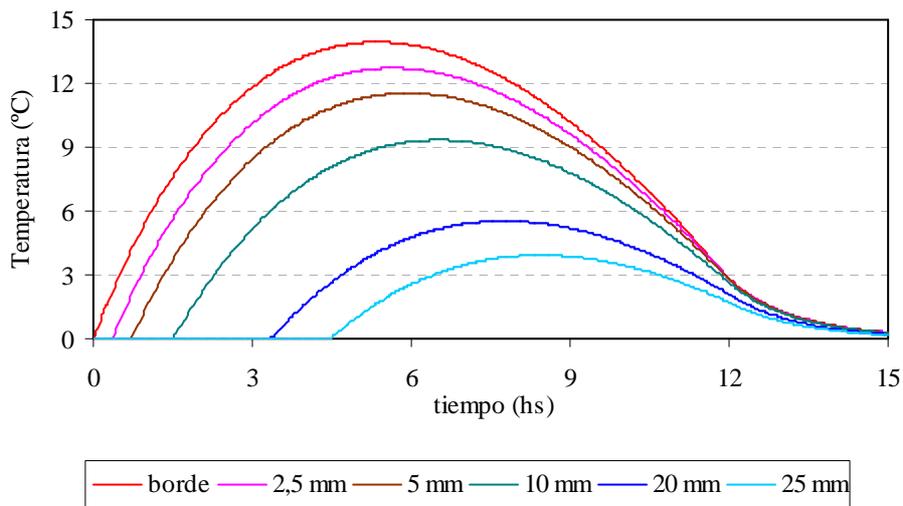


Figura 7: Distribución de temperaturas en el interior de la sustancia para el flujo decreciente.

Es interesante observar que la energía entregada por unidad de área, $E(\tau) = 4320 \text{ kJ/m}^2$ que en este caso, es igual para todos los flujos a lo largo de las 12 horas, es la suma de la almacenada por calor latente $El(\tau)$ y sensible $Es(\tau)$ en el material durante todo el proceso, (Tarzia, 1984) los que están dado respectivamente en las ecuaciones (13) y (14), en la que Nx representa el número total del puntos de la grilla y τ el tiempo total del cálculo igual a 12 horas.

$$El(\tau) = \rho L s(\tau) \tag{13}$$

$$Es(\tau) = \rho c \int_0^{s(\tau)} u(x, \tau) \cdot dx \cong \rho c \Delta x \sum_{i=0}^{i=Nx} u(i, \tau) \tag{14}$$

La cantidad de energía transferida por calor sensible se puede evaluar gráficamente si se representa la temperatura en función de la posición para cada instante de tiempo. En la Figura 8 se presenta dicha temperatura, a las 12 horas, para todos los flujos analizados. En ella se observa como la temperatura desciende desde un valor máximo en el borde que recibe calor hasta el valor cero en la interfase. El área debajo de cada curva es proporcional a la energía transferida por calor sensible, la constante de proporcionalidad es ρc .

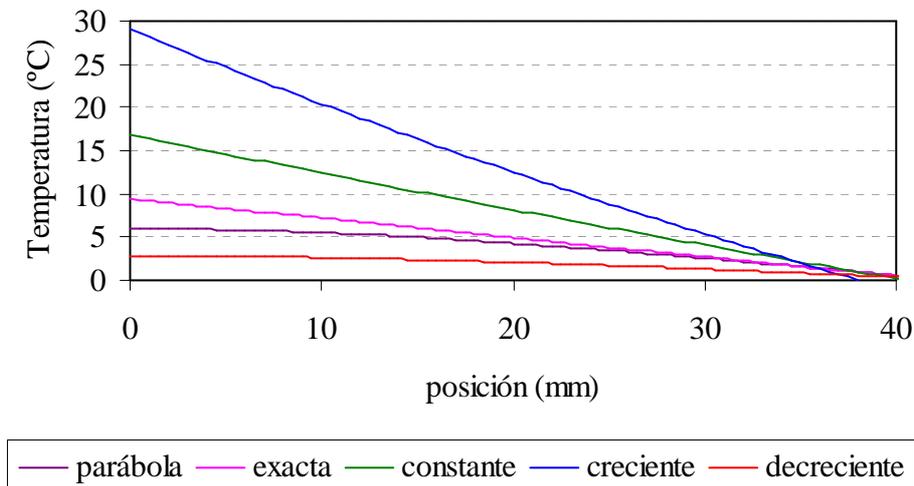


Figura 8: Temperaturas en función de la posición a las 12 horas.

Por otra parte, con la relación entre $E(\tau)$, $El(\tau)$ y $Es(\tau)$ se calculan los porcentajes de energía transferida por calor latente y sensible para cada flujo de calor estudiado, los que se presenta en la Tabla 3, en ella se observa que la mayor cantidad de energía se transfiere en la fusión del material.

Tipo de flujo	$El(\tau)/E(\tau)$ (%)	$Es(\tau)/E..(%)$
parabólico	95,28	4,72
exacto	94,13	5,87
constante	90,30	9,70
creciente	84,73	15,27
decreciente	97,67	2,33

Tabla 3: Razón de la energía transferida en forma latente y sensible en relación a la total.

4 CONCLUSIONES

El modelo de cálculo es completamente confiable y permite determinar la posición de la interfase y la distribución de temperaturas en forma rápida, lo que posibilita la evaluación del comportamiento de cualquier material de cambio de fase sometido a un determinado flujo de calor sin necesidad de recurrir a la construcción de un prototipo experimental con los costos adicionales que ello genera.

La mayor parte de la energía que recibe el material de cambio de fase se utiliza en producir este cambio. Además, cuanto mayor sea la fracción de calor sensible, más se eleva la temperatura y por tanto, menor es el avance de la frontera, tal como puede verse de las Tablas 2 y 3.

La evolución de la posición de la interfase líquido – sólido depende de la energía total recibida. Esta posición condiciona el espesor del material de cambio de fase a utilizar, el que

tal como se aprecia de los resultados no supera los 5 cm , al cabo de 12 horas, por lo que haciendo una extrapolación lineal un espesor de 20 cm es suficiente para acondicionar por lo menos durante dos días.

Se ha observado también que la posición de la interfase presenta una cota superior que puede evaluarse con un cálculo sencillo, lo que determina rápidamente el espesor de la pared de cambio de fase a utilizar.

La evolución de las temperaturas en la superficie del material de cambio de fase que está en contacto con la fuente térmica así como distribución de temperaturas en su interior (ambas en función del tiempo) dependen fuertemente del flujo de calor recibido, es decir de la forma en que la energía es entregada, lo que pone de manifiesto que si se pretende usar el material de cambio de fase como acondicionador deberá tenerse muy en cuenta la forma en que éste recibe el calor.

AGRADECIMIENTOS: El presente trabajo se desarrolló en el marco del proyecto de Investigación 1554 del Consejo de Investigaciones de la Universidad Nacional de Salta, a quien se agradece su financiamiento.

REFERENCIAS

- Alexiades, V y Solomon, A. *Mathematical Modeling of Melting or Freezing Processes*. Hemisphere Publishing Corporation, A Member of the Taylor & Francis Group, 1993.
- Boucíguez, A; Lozano, R y Lara, M. Some Considerations Regarding The Exact Solution in The One Phase Stefan Problem *Revista Engenharia Térmica (RETERM)*. ABCM. Vol. 5, N° 01, pp.35 – 39, 2006.
- Boucíguez, A; Lozano, R; Sánchez, A. y Lara, M. 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, pp. 2.23 – 2.30, 2006.
- Boucíguez, A; Lozano, R y Lara, M. An Energy Saving Proposal Using Organic Substances with Phase Change at Ambient Temperature. *Proceeding of the 11th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering - ENCIT 2006, Curitiba, Paraná, Brasil*, CIT06-0430, 2006.
- Farid, M; Khudhair, A; Razack, S y Al-Hallaj, S. A Review on Phase Change Energy Storage: Materials and Applications. *Energy Conversion and Management* 45, pp.1597 – 1615, 2004.
- Feldman, D; Banu, D y Hawes, D. Low Chain Esters of Stearic Acid as Phase Change Materials for Thermal Energy Storage in Building. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 36, pp. 311 – 322, 1995.
- Ghoneim, A; Klein, S y Duffie, J. Analysis of Collector Storage Building Walls Using Phase Change Materials. *Solar Energy*, Vol 47 N° 3 pp. 237 -242, 1991
- González, J y Boucíguez, A. Una Pared de Cambio de Fase Utilizada como Moderadora de Temperatura en el Envasado de Productos Agrícolas. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente Revista de la Asociación Argentina de Energía Solar*, Vol. 9, pp. 08.49 – 08.54. 2005.
- González, J. *Estudio de Problemas de Frontera Libre en Materiales de Cambio de Fase para su Aplicación en el Acondicionamiento Térmico de Productos Frutihortícolas*. Tesis de Licenciatura en Física, Facultad de Ciencias Exactas Universidad Nacional de Salta, 2006.
- Grodzka, F. *Phase Change Storage Systems*. Cap. 25. *Solar Energy Technology Handbook*. Part A. Engineering Fundamentals. Edited by W. Dickinson and P. Chermisinoff, 1980.

- Hamdan, M y Elwerr, F. Thermal Energy Storage Using a Phase Change Material. *Solar Energy*, Vol. 56, N° 2, pp. 183 – 189, 1996.
- Hasan, A y Sayigh, A. Some Fatty Acids as Phase Change Thermal Energy Storage Materials. *Renewable Energy*, Vol. 4, N° 1, pp. 69 – 76, 1994.
- Laamberg, P; Lehtiniemi, R y Henell, A. Numerical and Experimental Investigation of Melting and Freezing Processes in Phase Change Material Storage. *International Journal of Thermal Sciences*, 43, pp. 277 – 287, 2004.
- Lock, G. *Latent Heat Transfer. An Introduction to Fundamentals*. Oxford Engineering Science Series, 1996.
- Medina, M. Bouciguez, A. Lara, M. Diseño de un Embalaje para Productos Biológicos con Absorción del Calor de Respiración a través de un Material con Cambio de Fase. *Energías Renovables y Medio Ambiente, Revista de la Asociación Argentina de Energía Solar*, Vol. 14, pp. 39 – 44, 2004.
- Sherman, B. Free Boundary Problems for the Heat Equation in Which the Moving Interface Coincides Initially with the Fixed Face. *Journal of Mathematical Analysis and Applications* 33, pp. 449 - 466, 1971.
- Stritih, U. Heat Transfer Enhancement in Latent Heat Thermal Storage System for Building. *Energy and Building*, 35, pp. 1097 – 1104, 2003.
- Swern, D. *Physical Properties of Fats and Fatty Acids*. Cap. 3 Bailey's Industrial Oil and Fat Products, 1964.
- Swet, Ch. *Energy Storage for Solar Applications*. Cap. 6. Solar Energy Handbook. J. Kreider and F. Kreith. Mc Graw Hill Book Company, 1981.
- Tarzia, D. Soluciones Exactas del Problema de Stefan Unidimensional, Seminario sobre el Problema de Stefan y sus Aplicaciones. *Cuadernos del Instituto de Matemática "Beppo Levi"*. Univerisdad Nacional de Rosario, pp. 5-36, 1984.
- Tyagi, V y Buddhi, D. PCM Thermal Storage in Buildings: A State of Art *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 11, Issue 6, pp.1146-1166, 2007.
- Nochetto, R. Una Introducción General a la Resolución Numérica del Problema de Stefan Unidimensional. *Cuadernos del Instituto de Matemática "Beppo Levi"*. Univerisdad Nacional de Rosario, pp.143 –166, 1984
- Wolfram, S. *The Mathematica ® Book*. Wolfram Medio, Cambridge University Press. 4th Edition, 1999.
- Zerroukat, M; Chatwin, C. *Computational Moving Boundary Problems*. Research Studies Press LTD. John Wiley & Sons. England, 1994.