

## **ANÁLISIS DE SUSTANCIAS DE CAMBIO DE FASE CON FRENTE DE FUSIÓN INICIAL SOMETIDAS A UN FLUJO DE CALOR CONSTANTE.**

**Ricardo Lozano<sup>a</sup> y Angélica Boucíguez<sup>b</sup>**

*<sup>a</sup>Facultad de Ciencias Exactas. Universidad Nacional de Salta. Av. Bolivia 5150 – Salta, Argentina. Tel 0387 –4255424. e-mail: lozanor@unsa.edu.ar*

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

**Palabras claves:** cambio de fase, frente de fusión inicial, fuente térmica, interfase.

**Resumen:** Se analiza el comportamiento de sustancias orgánicas de cambio de fase cuando existe un frente de fusión inicial a una distancia del borde que está en contacto con una fuente térmica que proporciona un flujo de calor constante. Se han considerado dos perfiles térmicos iniciales: uno parabólico y otro lineal. El resto de la sustancia se encuentra sólida a la temperatura de fusión. El cálculo se lleva a cabo con un programa que permite evaluar simultáneamente la distribución de temperaturas en función de la posición y del tiempo y el avance temporal del frente de fusión. Los resultados obtenidos muestran que existe un período de transición, en que la distribución de temperaturas desde el borde que recibe el calor hasta la posición de la interfase no es lineal, la duración del mismo depende de la distribución inicial y de la condición impuesta en dicho borde. Al cabo de este período, la evolución del campo térmico es similar al que se produce cuando la sustancia está inicialmente en estado sólido a la temperatura de fusión y es sometida al flujo correspondiente. Se presenta a los fines de comparación el comportamiento de la sustancia de cambio de fase cuando no existe tal perfil inicial de temperatura.

## 1 INTRODUCCION

En el acondicionamiento térmico de locales destinados a diversos usos: viviendas, invernaderos, secaderos, puestos sanitarios, etc. pueden utilizarse sustancias que presenten cambio de fase sólido – líquido en el rango de temperaturas que se desee acondicionar. (Grodzka, 1980; Hamdan y Elwerr, 1996; Bouciguez, et al., 2006; Farid et al, 2004) En tales situaciones, por lo general, la sustancia se encuentra al inicio del proceso, totalmente sólida a temperatura igual o menor que la de fusión.

Por otra parte, las sustancias no deben ser tóxicas, ni corrosivas, ni inflamables y ser químicamente estables. Es conveniente que tanto su calor específico y su calor latente de fusión sean altos, para aprovechar la transferencia de calor tanto en forma sensible como latente. Asimismo, los volúmenes específicos de líquido y sólido deben ser similares.

Pueden utilizarse sustancias orgánicas o inorgánicas, sin embargo, las primeras resultan más adecuadas pues no presentan problemas de sub-enfriamiento y soportan mayor cantidad de ciclos de fusión – solidificación, sin sufrir cambios relevantes 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 sustancias orgánicas, en el acondicionamiento térmico de locales, con un frente de fusión inicial, estando la posición de la interfase líquido – sólido, (representada con la letra “ $s$ ”) a una determinada distancia del borde de la pared que será expuesta a la condición de flujo de calor exterior. Esta interfase se ha señalado con  $s(0)=b$ , a partir de ese punto la sustancia se encuentra sólida a la temperatura de fusión. Esta situación es más general que aquella en que la posición inicial de la interfase es  $s(0)=0$ . Un esquema del mismo, indicando la condición inicial en ambas situaciones ( $s(0)=0$  y  $s(0)=b>0$ ) se muestra en la **Figura 1**, donde se señala con  $x=0$  y  $x=a$  los límites del recipiente y con  $x=s(t)$  la posición de la interfase.

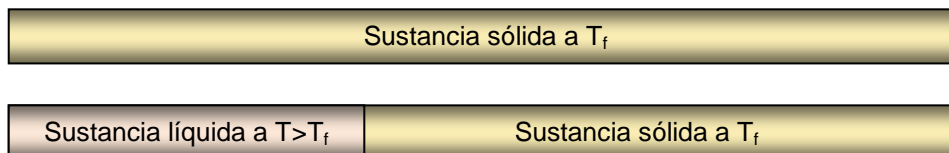


Figura 1: Esquema de la posición inicial del sólido y la posición de la interfase.

Se analiza esta situación cuando  $a=20$  cm y  $b=100$ mm y la distribución de temperaturas entre  $x=0$  y  $x=b$  es una parábola que presenta un máximo de  $20^\circ\text{C}$ , en la mitad del intervalo, estando los extremos del mismo a  $0^\circ\text{C}$  y otra en que tal distribución es lineal decreciente desde  $20^\circ\text{C}$  en  $x=0$  hasta  $0^\circ\text{C}$  en  $x=b$ . Obsérvese que necesariamente en  $x=b$ , la temperatura debe ser nula, ya que en este punto se encuentra la superficie de separación entre ambas fases, la que debe estar a la temperatura de fusión. Ambas situaciones son perfectamente factibles, pues si bien es deseable iniciar el proceso de acondicionamiento con sustancia completamente sólida, para ser utilizada en un nuevo ciclo, ésta debe enfriarse durante un cierto tiempo, pudiendo no haber alcanzado completamente el estado sólido en todo su interior, quedando, por tanto, con una determinada distribución de temperatura. Conocida esta distribución inicial, se analiza el comportamiento de la sustancia cuando se encuentra sometida a un flujo de calor conocido.

Ambas situaciones propuestas, son perfectamente factibles en la práctica: la parábola corresponde a un enfriamiento desde el borde que no ha sido suficiente para solidificar completamente el material de cambio de fase, mientras que la distribución lineal representa la

situación en que la sustancia se utilice luego de haber estado almacenada y se la coloca directamente en contacto con el recinto a acondicionar, presentado una distribución de temperatura desde el borde expuesto al exterior.

En tales condiciones, debido al ingreso de calor, la sustancia comienza el proceso de fusión, el mismo es paulatino, dando lugar a una fase líquida que avanza en el tiempo y en el espacio. Asimismo existe una superficie de separación entre el líquido emergente y el sólido existente que se mueve en el tiempo, con una ley que es desconocida a priori.

El problema consiste en determinar la distribución de temperatura en función de la posición y el tiempo en el líquido y la posición de la interfase en función del tiempo. Ambas deben evaluarse simultáneamente, es allí donde radica el interés y la dificultad del problema. Esta situación se conoce en bibliografía como de Stefan a una fase, dado que si bien ambas fases (sólida y líquida) están físicamente presentes solamente existe un gradiente de temperatura en el líquido, mientras que el sólido permanece a la temperatura de fusión. (Alexiades y Solomon, 1993)

Por tratarse de un problema a una fase, mientras exista sustancia sólida, puede estudiarse separadamente el comportamiento de la sustancia desde cada lateral y luego aplicarse el principio de superposición. (Bouciguez, et al. 2006)

En virtud de ello, como el interés radica en evaluar el comportamiento de la sustancias de cambio de fase, sometida al flujo de calor con frente de fusión inicial, se la ha tomado a los efectos del cálculo como semi - infinita, considerando la distribución de temperatura as y la posición de la interfase desde  $x=0$ , situación que es válida mientras existe sustancias sólida.

Sin pérdida de generalidad la temperatura de fusión puede tomarse en  $0^{\circ}\text{C}$ , de modo los valores obtenidos representan el salto térmico entre la temperatura real y la de fusión.

Las dimensiones del recipiente que contiene la sustancia no deben ser grandes para no restar espacio al habitáculo, que se desee acondicionar, ni agregar peso a la construcción, por lo que el ancho de la pared de cambio de fase no debe superar los 20 cm, siendo las restantes dimensiones (alto y largo) significativamente más grandes que ésta. En estas condiciones no se presentan efectos convectivos o éstos son muy débiles, por lo que el problema puede tratarse como conductivo y unidimensional, tal como lo expresan diversos autores. (Alexiades y Solomon, 1993; Zerroukat y Chatwin, 1994; Lock, 1996; Hamdan y Al-Hinti, 2004)

## 2 FORMULACION MATEMATICA DEL PROBLEMA Y MODELO DE CALCULO

El problema numérico a resolver resulta completamente descrito por la ecuación de difusión en la fase líquida y el balance de energía en la interfase, denominada precisamente ecuación de Stefan, sujeto a las correspondientes condiciones iniciales y de borde de cada situación particular. En este caso se ha considerado que la sustancia recibe un flujo de calor proveniente del medio exterior. Se han tomado flujos de calor de 25, 50, 75 y  $100 \text{ W/m}^2$  a los efectos de analizar el comportamiento de la sustancia ante diferentes cantidades de calor a las que se encuentra expuesta. Se realiza también una comparación con lo que ocurriría si no existiera tal frente de fusión inicial. (Alexiades y Solomon, 1993) Designando con  $T(x,t)$  a la temperatura, función de la posición  $x$  y el tiempo  $t$  y con  $T_f$  a la temperatura de fusión, la diferencia entre ellas resulta la función  $u(x,t) = T(x,t) - T_f$ . El flujo de calor impuesto en  $x=0$  es  $q_0$  y  $s(t)$  la posición de la interfase como función del tiempo, la que en  $t=0$  se encuentra en la posición  $x=b>0$ . Los parámetros físicos del material de cambio de fase son:  $\rho$  la densidad,  $k$  la conductividad térmica,  $c$  el calor específico,  $L$  el calor latente de fusión y  $\alpha=k/(\rho c)$  la difusividad térmica. El problema resulta descrito por las ecuaciones (1) a (6), siendo  $\tau$  el

tiempo total de cálculo.

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

$$\rho L \frac{ds(t)}{dt} = -k \frac{\partial u(x = s(t)^-)}{\partial x} \quad 0 < t < \tau \quad (2)$$

$$u(s(t), t) = 0 \quad 0 < t < \tau \quad (3)$$

$$u(x, 0) = \begin{cases} u(x) & 0 \leq x \leq b \\ 0 & x > b \end{cases} \quad (4)$$

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

$$q(0, t) = -k \left. \frac{\partial u(x, t)}{\partial x} \right|_{x=0} = q_0 > 0 \quad 0 < t < \tau \quad (6)$$

La ecuación (1) es la de difusión en el líquido, que determina la distribución de temperatura en él. El sólido se mantiene a la temperatura de fusión por lo que no es necesario establecer ecuación alguna en tal región. La ecuación (2) es la de Stefan, que da el balance de energía en la interfase. Las ecuaciones (3) - (6) son las condiciones iniciales y de borde.

A los efectos del cálculo se han tomado los valores de las propiedades térmicas, de grasas orgánicas monosaturadas comerciales, de fácil adquisición en el mercado local, medidas en laboratorio:  $\rho=914.5 \text{ kg/m}^3$ ;  $k=0.76 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ ;  $L=140\text{kJ/kg}$  y  $c=6950 \text{ J/Kg K}$ . El valor de  $b$  se ha tomado en 100mm.

La distribución inicial de temperaturas, se presenta en la [Tabla 1](#) y corresponden respectivamente a una parábola y una recta; donde  $x$  se expresa en mm y  $u(x)$  en °C, obsérvese que necesariamente estas funciones deben anularse en  $x=b$ , puesto que allí se encuentra la interfase, las mismas se presentan gráficamente en la [Figura 2](#).

Distribución inicial de temperatura en $0 < x < b$	Comentario
$u(x) = -0.008x^2 + 0.8x$	Parábola de 20°C máximo
$u(x) = -0.2x + 20$	Recta de 20 a 0°C

Tabla 1: Distribución inicial de temperatura en la fase líquida

El problema no tiene solución analítica por lo que sólo puede resolverse numéricamente. Para ello se ha realizado un programa de computación utilizando el lenguaje *Mathematica*, el que haciendo uso de las subrutinas que tiene implementadas permite calcular simultáneamente la posición de la interfase y la distribución de temperaturas en la sustancia.

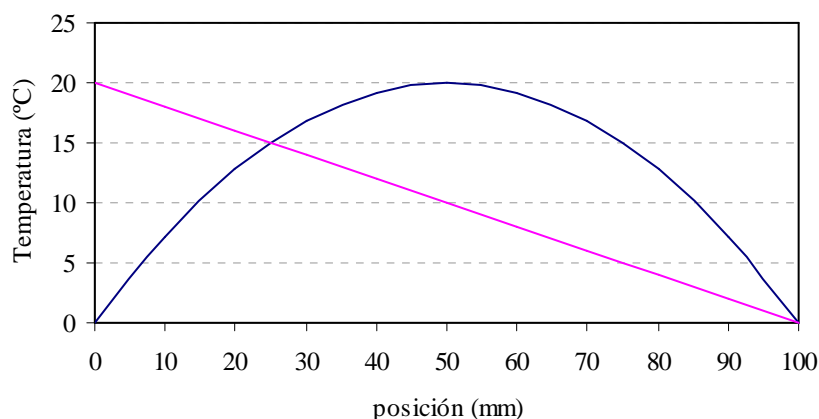


Figura 2: Condiciones iniciales de temperatura.

El esquema de resolución numérica se ajusta al presentado por Nochetto (1984), el mismo requiere cierta regularidad en la frontera  $s(t)$ , en particular que sea siempre creciente, situación que se cumple en la mayor parte de los problemas de frontera libre y en este en particular.

La ecuación (2), que da el balance de energía en la interfase, es equivalente a la condición integral, dada por la ecuación (7)

$$s(t) = b + \frac{c}{L} \int_0^b u(x,0) dx + \int_0^t q_0 dz - \frac{c}{L} \int_0^{s(t)} u(x,t) dx \quad (7)$$

Esta ecuación se discretiza mediante el método de diferencias finitas implícitas de la siguiente forma:

- El espacio  $x_i = i dx$ , siendo  $i$  el índice de la variable  $x$  y  $dx$  el intervalo espacial fijo.
- El tiempo  $t_j = j dt$ , siendo  $j$  el índice de la variable  $t$  y  $dt$  el intervalo temporal fijo.
- El campo térmico  $u(i,j) = u(x_i, t_j)$
- La posición de la frontera libre  $s(j) = s(t_j)$

La derivada segunda, en la ecuación (1) se aproxima por la relación dada en la ecuación (8)

$$\frac{\partial^2 u(i,j)}{\partial x^2} = \frac{1}{h^2} [u(i-1,j) + u(i+1,j) - 2u(i,j)] \quad (8)$$

Llamando  $N(j)$  a la parte entera de  $(s(j)/dx)$ , el problema consiste en hallar las  $N(j)+1$  temperaturas  $u(i,j+1)$  en el instante  $(j+1)dt$  y la posición de la frontera libre  $s(j+1)$  en ese mismo instante, para  $1 \leq i \leq [N(j) - 1]$ , tales que, se verifique la ecuación (9), para puntos en el interior de la masa del líquido, mientras que en la proximidad de la frontera resulta aplicable la ecuación (10)

$$\frac{u(i,j+1) - u(i,j)}{dt} = \frac{\alpha}{(dx)^2} [u(i-1,j+1) + u(i+1,j+1) - 2u(i,j+1)] \quad (9)$$

$$\frac{u[N(j),j+1] - u[N(j),j]}{dt} = \left( \frac{2\alpha}{dx} \right) \cdot \left( \frac{u[N(j)-1,j+1]}{s(j+1) - (N(j)-1)dx} - \frac{u[N(j),j+1]}{s(j+1) - N(j)dx} \right) \quad (10)$$

La condición en el borde fijo, dada por la ecuación (6) al ser discretizada queda expresada por la ecuación (11)

$$u(1, j+1) - u(0, j+1) = -\frac{dx}{k} q(0, (j+1)dt) \quad (11)$$

La ecuación (7) para la interfase, al ser discretizada se expresa por la ecuación (12)

$$s(j+1) = b + \frac{c}{2L} dx \left[ u(0,0) + 2 \sum_{i=1}^{N(0)-1} u(i,0) + u(N(0),0) \right] + \frac{c}{L} (b - N(0)) \cdot u(N(0),0) + \frac{q_0}{\rho L} (j+1)dt - \frac{c}{2L} dx \left[ u(0, j+1) + 2 \sum_{i=1}^{N(j)-1} u(i, j+1) + u(N(j), j+1) \right] - \frac{c}{2L} (s(j+1) - N(j)dx) \cdot u(N(j), j+1) \quad (12)$$

Las ecuaciones (9) a (12) conducen a un proceso iterativo que resuelve el problema (9) – (11) a partir de un valor dado para  $s(j+1)$  y luego recalcula  $s(j+1)$  de (12), reiniciando el proceso con el nuevo valor de  $s(j+1)$ . La grilla se modifica agregando un nodo si se verifica que  $(N(j)+1) dx < s(j+1)$ . El intervalo temporal considerado para el cálculo es  $dt=900\text{seg}$ , mientras que el espacial es  $dx=1\text{mm}$ .

### 3 RESULTADOS OBTENIDOS.

Por tratarse de un problema a una fase, se ha estudiado el problema semi – infinito, dado que si no lo es y el material de cambio de fase presenta una longitud finita se lo puede tratar como la superposición de dos problemas semi – infinitos, que provienen desde cada lateral. (González, 2006)

Los resultados obtenidos, para las dos posiciones iniciales del frente de fusión se presentan en la [Tabla 2](#), en columnas “Parábola” y “Lineal”, en ella se muestra también, a título de comparación lo que sucedería si la sustancia no tuviera tal frente de fusión inicial, en columna “Totalmente sólido”, estando expuesta a las mismas condiciones de contorno. Se señalan, las posiciones de las interfases y las temperaturas alcanzadas en el punto  $x=0$  y  $x=b$ , al cabo de 12, 24, 36 y 48 horas.

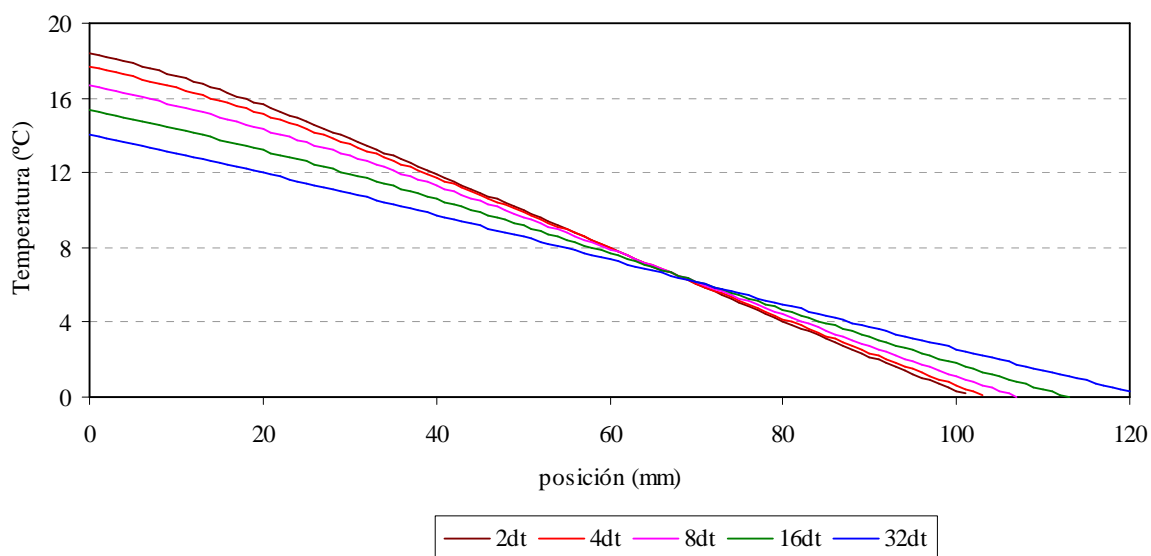
q(0,t) (W/m <sup>2</sup> )	Totalmente sólido				Parábola				Lineal			
	25	50	75	100	25	50	75	100	25	50	75	100
s(12hs) (mm)	8.38	16.45	23.96	30.92	138.1	139.1	140.1	141.0	129.0	130.2	131.4	132.5
T(0,12hs) (°C)	0.27	1.06	2.26	3.78	9.54	12.20	14.85	17.51	8.20	10.84	13.50	16.13
T(b,12hs) (°C)	0	0	0	0	3.13	3.60	4.10	4.60	2.16	2.60	3.05	3.51
s(24hs) (mm)	16.65	32.20	46.07	58.26	154.0	157.7	161.3	164.6	143.4	147.8	152.0	155.8
T(0,24hs) (°C)	0.54	2.03	4.18	6.68	7.18	10.84	14.51	18.20	6.18	9.80	13.43	17.07
T(b,24hs) (°C)	0	0	0	0	2.78	3.88	5.04	6.21	2.03	3.05	4.14	5.26
s(36hs) (mm)	24.81	47.31	66.66	83.21	165.0	172.5	179.3	185.4	153.5	162.2	169.7	176.5
T(0,36hs) (°C)	0.80	2.93	5.90	9.36	6.31	10.68	15.08	19.52	5.53	9.81	14.16	18.54
T(b,36hs) (°C)	0	0	0	0	2.60	4.23	5.96	7.74	1.96	3.50	5.15	6.87
s(48hs) (mm)	32.90	61.90	86.21	106.5	174.1	185.7	195.8	204.7	162.1	175.1	178.1	196.0
T(0,48hs) (°C)	1.06	3.77	7.45	11.70	6.00	10.90	15.91	21.00	5.34	10.16	14.62	20.10
T(b,48hs) (°C)	0	0	0	0.62	2.55	4.65	6.91	9.24	2.01	4.00	5.65	8.43

Tabla 2: Posiciones de la frontera y temperaturas para los flujos estudiados y los frentes de fusión inicial.

En las [Figuras 3 a 6](#), se presentan los resultados obtenidos cuando el frente de fusión inicial es una recta, para los flujos de 75 y 100 W/m<sup>2</sup>. En las [Figuras 3 y 5](#) se muestran la distribución de temperaturas en función de la posición para intervalos de tiempo de 2, 4, 8, 16 y 32dt con

ambos flujos. En las Figuras 4 y 6 se presenta la distribución de temperaturas en función de la posición a distintos tiempos, también para ambos flujos. En todas ellas se utiliza los mismos colores para representar iguales variables.

En las Figuras 7 a 10, se presentan los resultados obtenidos cuando el frente de fusión inicial es una parábola, para los flujos de 75 y 100 W/m<sup>2</sup>. En las Figuras 7 y 9 se muestran la distribución de temperaturas en función de la posición para intervalos de tiempo de 2, 4, 8, 16 y 32dt con ambos flujos. En las Figuras 8 y 10 se presenta la distribución de temperaturas en función de la posición a distintos tiempos, también para ambos flujos. En todas ellas se utiliza los mismos colores para representar iguales variables.



Figuras 3: Temperatura en función de la posición a distintos intervalos tiempos, cuando el flujo de calor es de 75W/m<sup>2</sup> y el frente de fusión inicial es una recta

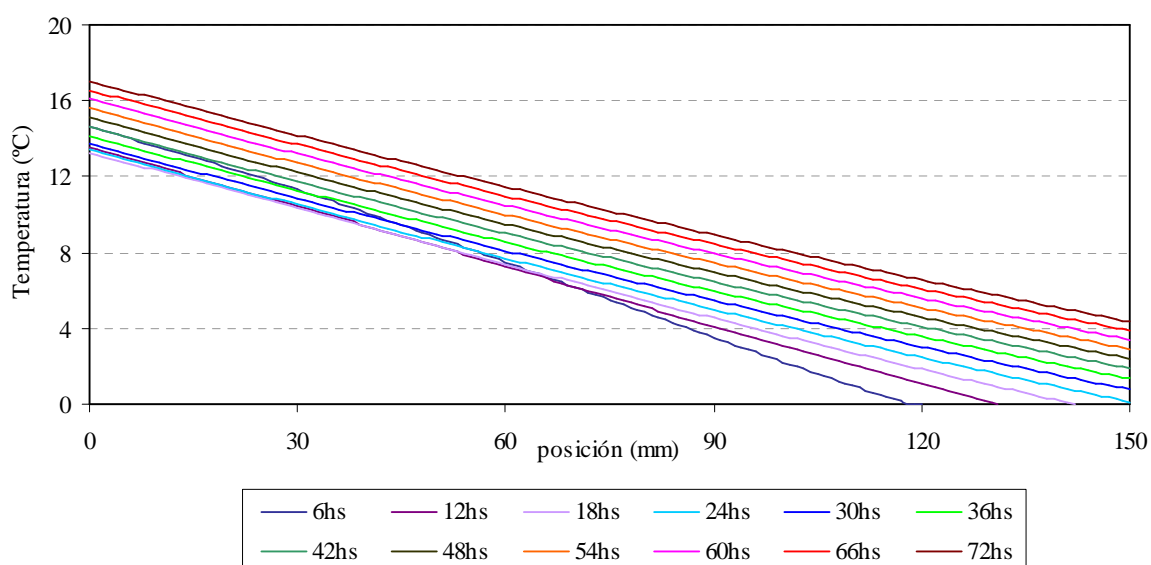
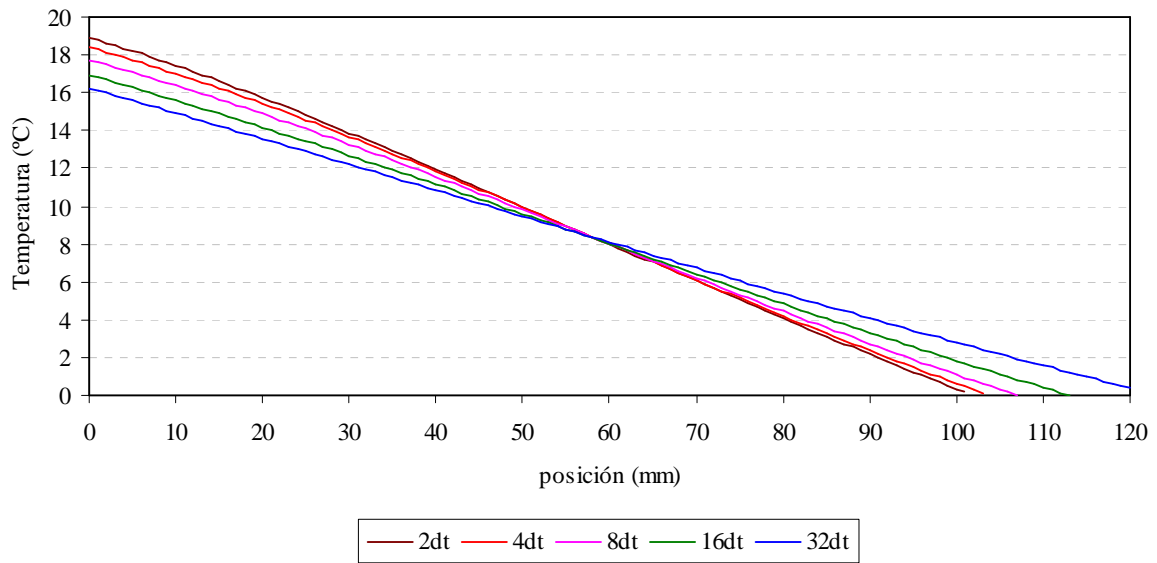


Figura 4: Temperatura en función de la posición para distintos tiempos, cuando el flujo de calor es de 75W/m<sup>2</sup> y el frente de fusión inicial es una recta.



Figuras 5: Temperatura en función de la posición a distintos intervalos tiempos, cuando el flujo de calor es de  $100\text{W/m}^2$  y el frente de fusión inicial es una recta.

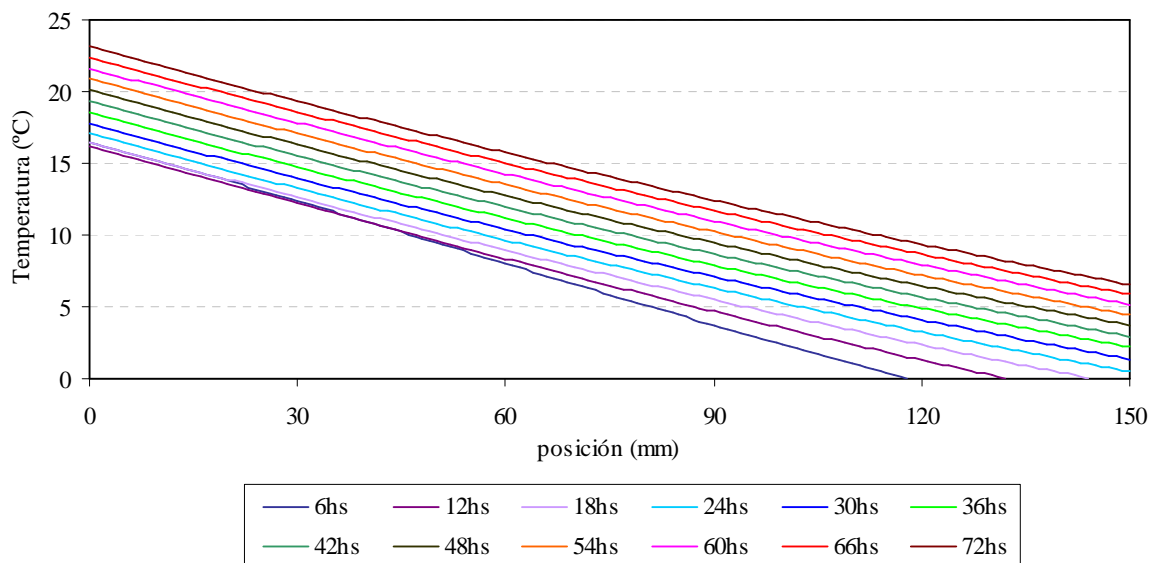
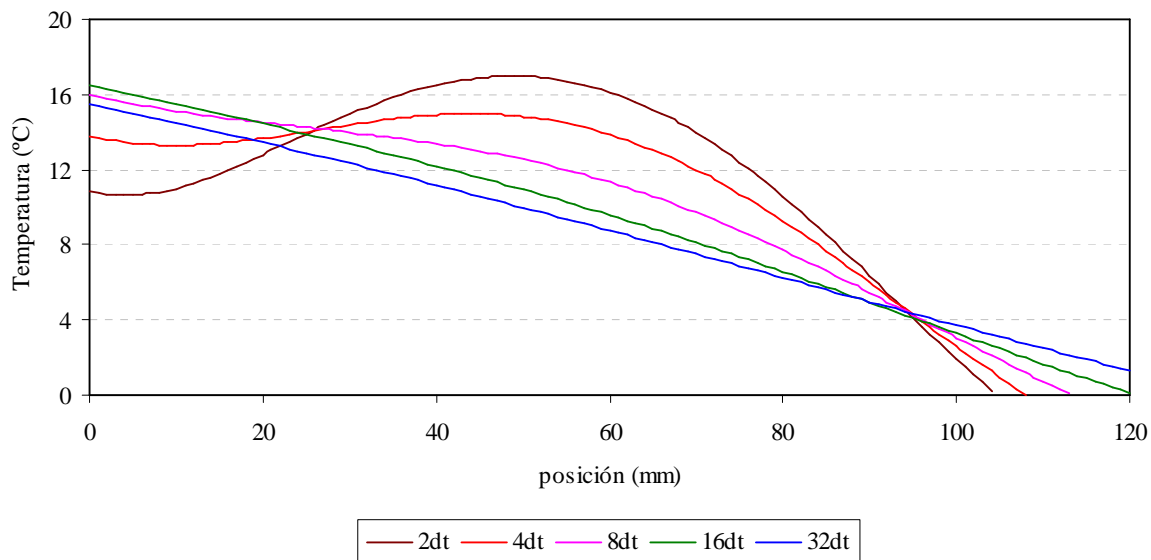


Figura 6: Temperatura en función de la posición para distintos tiempos, cuando el flujo de calor es de  $100\text{W/m}^2$  y el frente de fusión inicial es una recta.





Figuras 7: Temperatura en función de la posición a distintos intervalos tiempos, cuando el flujo de calor es de  $75\text{W/m}^2$  y el frente de fusión inicial es una parábola.

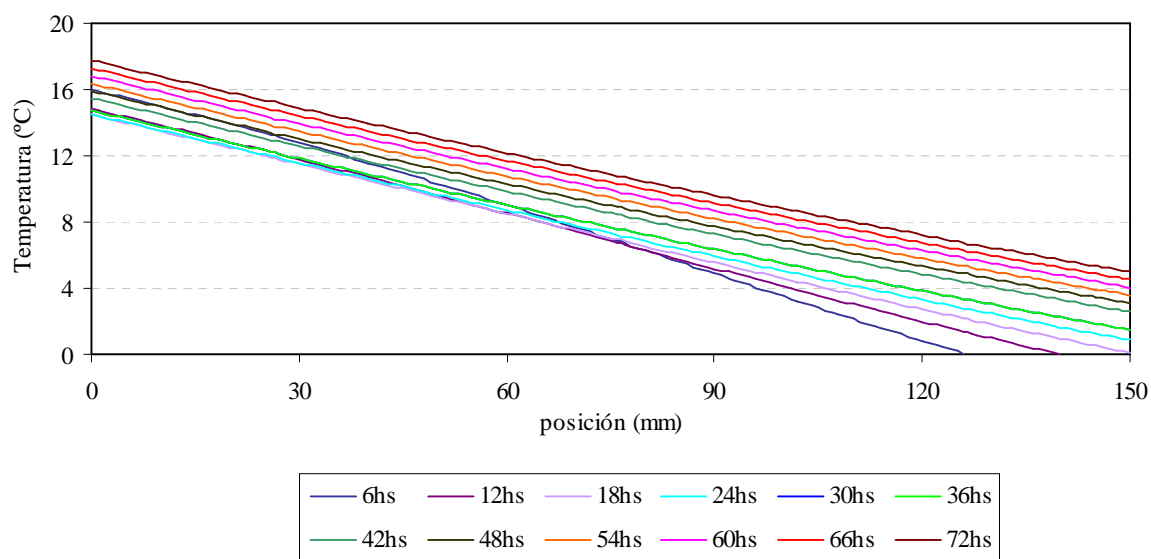
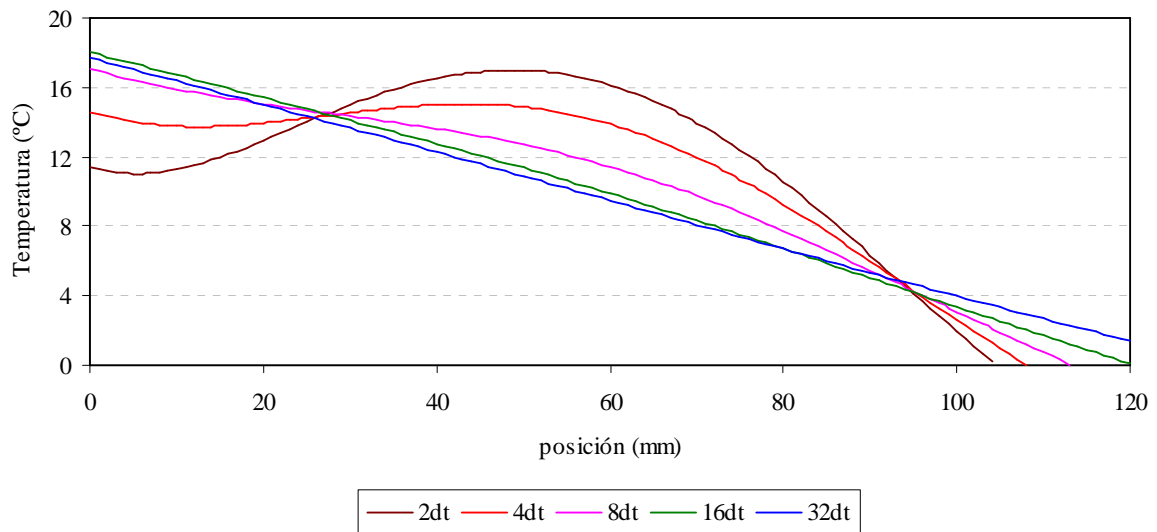


Figura 8: Temperatura en función de la posición para distintos tiempos, cuando el flujo de calor es de  $75\text{W/m}^2$  y el frente de fusión inicial es una parábola.



Figuras 9: Temperatura en función de la posición a distintos intervalos tiempos, cuando el flujo de calor es de  $100\text{W/m}^2$  y el frente de fusión inicial es una parábola.

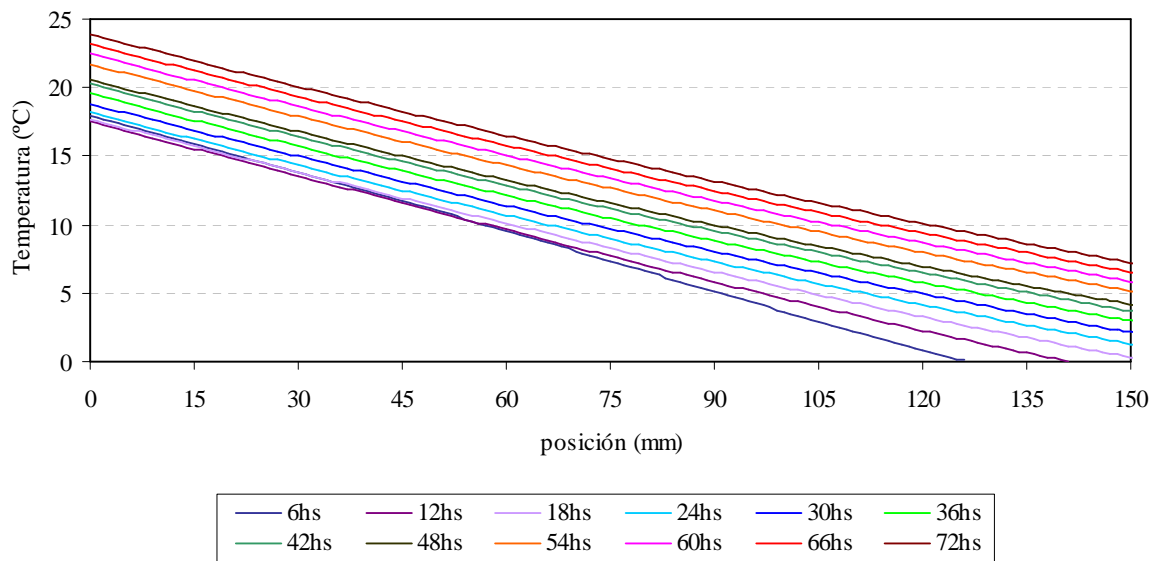


Figura 10: Temperatura en función de la posición para distintos tiempos, cuando el flujo de calor es de  $100\text{W/m}^2$  y el frente de fusión inicial es una parábola.

En la [Figura 11](#), se muestra lo posición de la interfase en función del tiempo y la evolución de temperatura en los puntos  $x=0$  y  $x=b=100$  mm, para el flujo de  $100\text{W/m}^2$ , cuando no existe frente de fusión inicial y para los dos frentes estudiados.

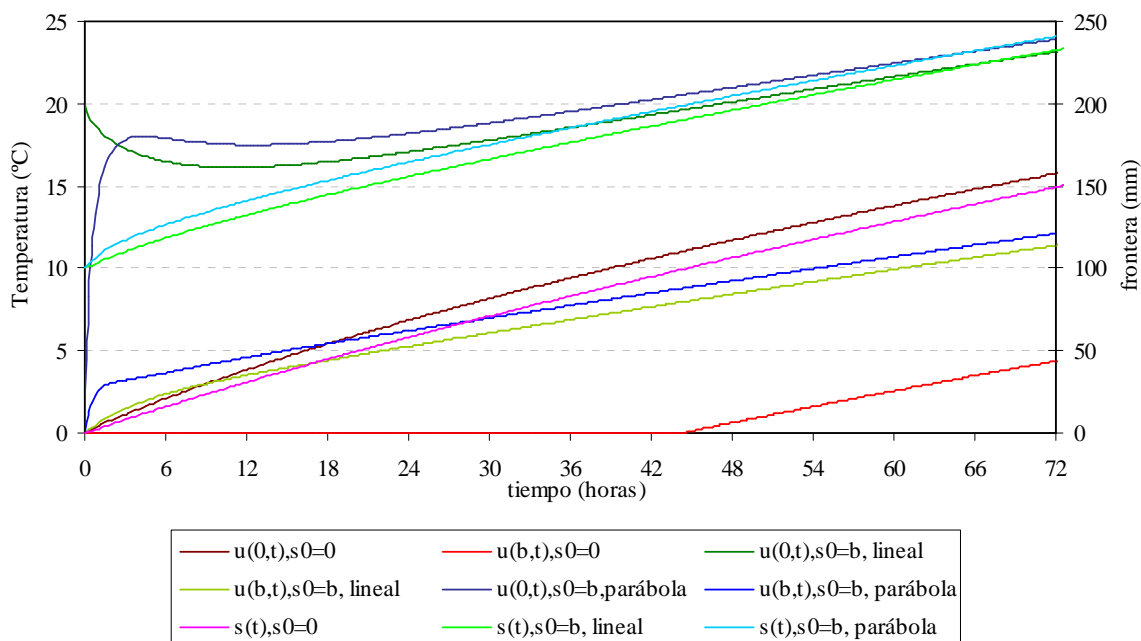


Figura 11: Posiciones de la interfase y temperaturas en  $x=0$  y  $x=b$ , en función del tiempo, para el flujo de  $100\text{W/m}^2$ .

En las Figuras 3, 5, 7 y 9 se observa que cuando la sustancia se pone en contacto con la fuente térmica y comienza el proceso de fusión, aparece un período de transición, durante el cual la distribución de temperaturas desde el borde hasta la posición de la interfase no es lineal, cuya duración depende del valor de la temperatura en el borde. Luego de un cierto tiempo, esta distribución se hace lineal; dependiendo de la condición impuesta en dicho borde. Esta situación se observa claramente en las Figuras 7 y 9, que corresponden al caso en que el frente de fusión inicial es una parábola y en menor medida en las 3 y 5 en que el frente de fusión inicial es una recta. Esta situación se aprecia también en la Figura 11, siendo también más notorio en el caso de la parábola que de la recta. Este hecho no se observa en el avance de la interfase en función del tiempo, pues esta avanza desde un determinado punto,  $x=0$  ó  $x=b$ , según el caso.

#### 4 ANALISIS DE RESULTADOS.

De acuerdo a los valores presentados en la Tabla 2 y las Figuras 3 a 11, para la situación en que existe una distribución inicial temperatura en el líquido, se observa que para todos los flujos de calor, la temperatura en el borde que lo recibe primero desciende en el tiempo alcanzando un mínimo y luego aumenta. Esto es así debido a que al avanzar el frente de fusión, la distribución de temperaturas pasa por un periodo de transición, dependiendo de la condición impuesta en el mismo, hasta que se uniformiza, tendiendo a una distribución lineal de temperatura desde el borde en forma similar a lo que ocurre cuando la sustancia se encuentra inicialmente sólida a la temperatura de fusión, es decir, no existe frente de fusión inicial.

Se observa también que para flujos altos, mayores a  $50\text{W/m}^2$ , la temperatura en el borde fijo luego de pasar por dicho mínimo puede elevarse significativamente con el correr del tiempo, alcanzando valores que podrían no ser aptos de acuerdo a las temperaturas requeridas para el acondicionamiento térmico previsto.

En las condiciones externas propuestas, un espesor de pared de cambio de fase de 15 cm resulta adecuado para el acondicionamiento térmico durante por lo menos 20 hs, siendo este tiempo mayor cuanto menor es el flujo de calor al que se encuentra expuesto dicho material.

En cambio, si la sustancia se encuentra completamente sólida al inicio del proceso, estos tiempos resultan significativamente mayores, pudiendo llegar a ser de más de 72 hs.

No obstante, es importante tener en cuenta que si bien estos resultados corresponden a la situación inicial tomada para el cálculo, en la práctica la sustancia de cambio de fase se encuentra originalmente en estado sólido a temperatura a lo sumo igual a la de fusión y por tanto la condición inicial tomaría correspondiente a las que ésta alcance en un tiempo posterior al inicio del acondicionamiento o a la situación en que al iniciarlo no se le haya dado el tiempo suficiente para que la sustancia se solidifique por completo. En efecto, tal como se aprecia en la [Tabla 2](#), para que la interfase alcance los 100 mm, han debido transcurrir más de 48 horas, para flujos menores a  $100 \text{ W/m}^2$ , siendo este flujo el que produce la llegada del frente de fusión a los 100 mm, al cabo de 44,5 hs tal como se aprecia en la [Figura 11](#).

## 5 CONCLUSIONES

El modelo numérico presentado ha sido validado en trabajos anteriores contrastando los resultados por él arrojados con los correspondientes a situaciones en que existe solución analítica por lo que resulta confiable. El mismo, admite introducir cualquier distribución inicial de temperatura y posición de la frontera; por ello, puede realizarse rápida y confiablemente, el análisis de cualquier acondicionamiento térmico, debiendo darse las condiciones iniciales que correspondan a la situación a considerar.

Las sustancias de cambio de fase presentan una interesante opción para el acondicionamiento térmico de locales destinados a diversos fines: invernaderos, secaderos, viviendas, centros sanitarios, acopio de productos agrícolas, almacenamiento de productos químicos y medicinales, etc, dependiendo el tiempo de acondicionamiento de cada situación particular. Además, contribuyen al ahorro de energía, ya que usualmente se emplea energía eléctrica para el mantenimiento de temperaturas de estos recintos. Su utilización podría reemplazarse completamente o por lo menos disminuirse en gran medida; haciendo que su consumo sea menor.

Los resultados obtenidos muestran que la existencia de un frente de fusión inicial produce diferencias importantes respecto de cuando éste no está presente. El tiempo necesario para que se alcance la posición inicial de la interfase está directamente relacionado con el valor del flujo, dependiendo también de éste las temperaturas alcanzadas por la sustancia.

Dado que se estima que el espesor de la pared de cambio de fase, debería ser de unos 15 cm de espesor, a los efectos de no restar espacio al recinto que a acondicionar, se observa que en las condiciones analizadas, las temperaturas alcanzadas resultan razonables, para por lo menos un día, luego podría ser necesario el uso de energía auxiliar. Aunque al respecto, es bueno tener en cuenta que tales sustancias al estar almacenadas como paredes del propio local a acondicionar, podría quedar expuestas al exterior, logrando bajar su temperatura en horas de la noche para reiniciar nuevamente el proceso al día siguiente. Esto demuestra que el acondicionamiento térmico propuesto depende también de las condiciones en que sea emplazado. No obstante, es importante señalar que el ahorro energético es significativo, lo que conlleva a la disminución en la utilización de energías convencionales y al cuidado del medio ambiente.

## 6 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.

## 7 REFERENCIAS

- Alexiades, V.; Solomon, A. *Mathematical Modeling of Melting or Freezing Processes*, Hemisphere Publishing Corporation, A Member of the Taylor & Francis Group, 1993.
- Bouciguez, 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, pág. 2.23 – 2.30, 2006.
- Farid, M; Khudhair, A; Razack, S y Al-Hallaj, S. A Review on Phase Change Energy Storage: Materials y Applications *Energy Conversion and Management* N° 45, pp. 1597-1615, 2004.
- Grodzka, F. Phase Change Storage Systems. Cap. 25. *Solar Energy Technology Handbook*. Part A. Engineering Fundamentals. Edited by W. Dickinson and P. Cheremisinoff, 1980
- 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, 2004.
- Hamdan, M.; Elwerr, F. Thermal Energy Storage Using A Phase Change Material. *Solar Energy*, Vol. 56, N° 2, pág. 183 – 189, 1996.
- Hamdan, M y Al-Hinti, I. Analysis of Heat Transfer During the Melting of a Phase Change Material. *Applied Thermal Engineering*, N° 13, pág. 1935 – 1944, 2004.
- Hasan, A y Saying, A. Some Fatty Acids as Phase Change Thermal Energy Storage Materials. *Renewable Energy*, Vol. 4, N° 1, pág. 69 – 76, 1994.
- Lock, G. On the Freeze Occlusion Water, Freezing and Melting Heat Transfer in Engineering, *Hemisphere*, New York, pág. 199 – 221, 1991.
- Lozano, R y Bouciguez, A. 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, 2004.
- Nochetto, R. Una Introducción General a la Resolución Numérica del Problema de Stefan Unidimensional. *Cuadernos del Instituto de Matemática "Beppo Levi"*. Universidad Nacional de Rosario, pág.143 -166, 1984.
- Sari. A y Kaygusuz, K. Thermal Performance of Myristic Acid as a Phase Change Material for Energy Storage Applications. *Renewable Energy*, Vol. 24, pág. 303 –317, 2001.
- Tunçbilek, K; Sari, A, Tarhan, S, Ergunes, G y Kaygusuz, K. Lauric and Palmitic Acids Eutectic Mixture as Latent Heat Storage Material for Low Temperature Heating Applications *Energy*, Vol. 30 pág. 677– 692, 2005.
- Zerroukat, M y Chatwin, C. Computational Moving Boundary Problems. *John Wiley & Sons Inc.*, 1994.