

UNA PARED DE CAMBIO DE FASE UTILIZADA COMO MODERADORA DE TEMPERATURA EN EL ENVASADO DE PRODUCTOS AGRÍCOLAS.

José González y Angélica Boucíguez
 Facultad de Ciencias Exactas – Universidad Nacional de Salta
 Av. Bolivia 5150 – 4400 – Salta
 Tel: 0387 – 4255424 – Fax: 0387 – 4255589
 e-mail: jogocal@yahoo.com - bouciga@unsa.edu.ar

RESUMEN: En este trabajo se plantea la posibilidad de utilizar materiales de cambio de fase en el envasado de productos agrícolas, con el fin de acondicionarlos térmicamente durante su transporte y almacenamiento. Dicho material estará envasado en un recipiente como parte de la pared del envase del producto agrícola, de modo que uno de sus laterales estará directamente en contacto con éste, mientras que el otro lateral estará en contacto con el ambiente exterior; de este modo el material de cambio de fase estará sometido a dos condiciones de borde, una de ellas es la temperatura externa, mientras que la otra es la correspondiente al producto almacenado. Los resultados obtenidos muestran que estas sustancias son capaces de absorber los cambios en dichas condiciones y de mantener el producto agrícola dentro de las condiciones de confort por ellos requeridas.

PALABRAS CLAVES: material de cambio de fase, producto agrícola, acondicionamiento térmico.

INTRODUCCION

La calidad global de los productos agrícolas frescos está determinada por diversos factores, tales como el estándar morfológico y comercial de la variedad, poder nutritivo y condiciones higiénico-sanitarias. Su control resulta una premisa ineludible si se quiere conservar la calidad inicial tanto en el almacenamiento como a lo largo de la cadena de distribución comercial hasta llegar al consumidor. (Pantásico, 1979)

El elevado contenido acuoso de gran parte de los productos recién cosechados hace que sean altamente vulnerables a los ataques por microorganismos y a la formación de hongos. Sus consecuencias pueden ir desde un deterioro aceptable y una pérdida de valor comercial hasta perjuicios irreparables que inutilizan el producto para su consumo. Por tanto, es importante centrar la atención en el período de almacenamiento y transporte del producto, para ello se analiza la posibilidad de utilizar sustancias de cambio de fase en tal acondicionamiento. (Boucíguez, 2001)

La sustancia de cambio de fase cumplirá esencialmente una función de control de temperaturas para mantener el producto en condiciones adecuadas. Para este acondicionamiento térmico se precisa disponer de un recipiente donde almacenar el producto o transportarlo, el que estará en contacto con el ambiente y con el producto a acondicionar. Un esquema del producto almacenado con las paredes que contienen el material de cambio de fase se muestra en la figura 1.

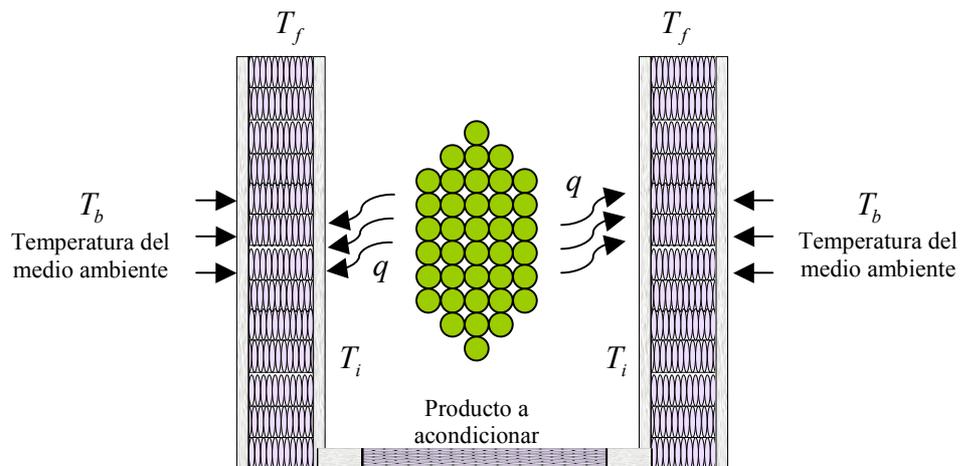


Figura 1: Corte Transversal del Interior del recipiente.

Este recipiente está formado por cuatro paredes dobles (en la figura se muestran solo dos) las cuales contienen en su interior la sustancia de cambio de fase, éstos se adosan a la pared del recinto donde se almacena el producto agrícola o al vehículo que lo transporta, con un espesor no superior a 20cm, por lo que el problema puede tratarse en forma unidimensional. El borde externo de las paredes está en contacto con el medio ambiente y el interno con el producto a acondicionar. En la situación analizada se consideró que el material de cambio de fase se encontraba inicialmente sólido a la temperatura de fusión. Así, a medida que transcurre el tiempo la sustancia se va tornando líquida por ambos laterales y las interfaces de separación se moverán desde cada borde hacia el interior. Dichas interfaces marcarán los límites entre la fase líquida y sólida.

La elección del producto que se desea acondicionar térmicamente condiciona la elección de la sustancia de cambio de fase, lo que está relacionado con el rango de temperatura al cual debe conservarse el producto. Por ejemplo, las cerezas y frutillas deben mantenerse alrededor de 0 C, los cítricos entre 5 y 8 C, la banana entre 12 y 14 C, la papa entre 10 y 13 C, los pimientos a 5 C; lo que demuestra que cada producto determina una temperatura de trabajo y con ello la temperatura de cambio de fase de la sustancia a utilizar. Sin embargo, esto no quiere decir que deba utilizarse una sustancia distinta para cada producto sino que dentro de un margen de temperatura se pueden utilizar una u otra sustancia de cambio de fase.

La cantidad de material que se pueda almacenar o transportar dependerá íntegramente de la tasa respiratoria de cada producto, mientras mayor sea la misma, menor será el tiempo de permanencia en sus condiciones de óptimas de producto fresco. Por ejemplo un recipiente de 3x1x2 m (largo, ancho y alto) puede contener aproximadamente 3200 kg de banana, 2300 kg de berenjenas, 2500 kg de papas. Las condiciones de temperatura con las cuales se realiza la simulación serán independientes de la cantidad de producto. Estas son funciones del tiempo, puesto que la temperatura es una condición variable a lo largo del día, así como la del producto a acondicionar. Las condiciones de contorno elegidas se han tomado en valores relativamente altos respecto a los que pueden presentarse en general en recintos destinados a tales fines, por lo que se considera que éstas son las situaciones más desfavorables.

PLANTEO DEL PROBLEMA

Dado que, como se ha dicho, el estado inicial de la sustancia es sólido a la temperatura de fusión, el problema se resuelve solamente en la fase líquida, puesto que la sólida ya existente permanece a la temperatura de fusión. Este problema se conoce en bibliografía como de Stefan a una fase. (Alexiades y Solomon, 1993) El mismo queda completamente descrito por las siguientes ecuaciones:

$$\frac{\partial u(x,t)}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2}, \quad (1)$$

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

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

$$u(x,0) = 0, \quad (4)$$

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

$$u(0,t) = f_1(t) \quad (6)$$

$$u(e,t) = f_2(t) \quad (7)$$

Donde $u(x,t)$, función de la variable espacial x y temporal t es la diferencia entre la temperatura y la de fusión, e es el espesor del material, $s(t)$ es la posición de la frontera que separa el líquido del sólido ya existente, y constituye una incógnita adicional del problema. Es de hacer notar que existirán dos fronteras libres, una que avanza desde $x=0$ hacia la derecha y otra que avanza desde $x=e$ hacia la izquierda. Ambas satisfacen la ecuación de Stefan, señalada con el número (2). Las propiedades térmofísicas del material de cambio de fase son: ρ densidad, c capacidad calorífica a presión constante, L calor latente de fusión, k conductividad térmica y $\alpha = k/\rho c$ difusividad térmica. Todas ellas se han considerado constantes en el cálculo.

La ecuación (1) es la de difusión en la fase líquida, la (2) da el balance de energía en la interfase (ecuación de Stefan), las ecuaciones (4) y (5) con las condiciones iniciales, mientras que las ecuaciones (3), (6) y (7) son las condiciones de borde, la (3) en la interfase, la (6) en el borde $x=0$ y la (7) en el borde $x=e$.

Obsérvese que estas ecuaciones plantean el problema en forma unidimensional, lo que es aceptable dado que, tal como se ha expresado anteriormente, el espesor de las paredes que contienen el material de cambio de fase es pequeño frente a las otras dos dimensiones involucradas; esto hace posible también considerar que la sustancia prácticamente no convecta.

En las paredes laterales se presentan dos condiciones de borde en forma simultánea. Una debida a la temperatura exterior y la otra al producto almacenado. El hecho de tener dos condiciones de borde simultáneamente abre la posibilidad de trabajar de dos formas diferentes: una simulando las condiciones por separado y otra creando un código fuente a través del cual se pueda evaluar en forma simultánea el avance de los dos frentes de fusión en el interior de la pared.

MODELO DE SIMULACIÓN

A los fines de evaluar el comportamiento de la sustancia de cambio de fase, se ha realizado un modelo de simulación numérica mediante un programa realizado en Pascal, utilizando diferencias finitas explícitas. El código fuente a través del cual se realiza la simulación de la situación tiene como base el programa utilizado para el problema de Stefan a una fase que ya fuera validado con anterioridad. (González y Boucíguez, 2004) Se trabaja con diferentes condiciones de borde de temperatura, las que se enumeran en la tabla 1. Cada caso es una condición de borde que puede presentarse en cualquiera de los dos extremos de la pared. Para cada caso se obtiene la curva que representa el avance de la frontera libre en función del tiempo.

Tabla 1: Diferentes condiciones borde a usar en cualquier extremo de la pared.

Casos Estudiados	Condición de borde (°C)	Comentarios
Caso 1	$T_b = 15$	La temperatura se mantiene constante
Caso 2	$T_b = t + 5$	La temperatura asciende a partir de 5°C a razón de 1° C/hora.
Caso 3	$T_b = 15 + 10 \cdot \text{sen}(\pi t / 12,5)$	La temperatura oscila alrededor de los 15 °C.

Cada uno de estos casos fue simulado teniendo en cuenta como factor principal el espesor de la pared. Se ha trabajado con un espesor de 20 cm y posteriormente de 15 cm. Esta disminución del espesor de la pared permite analizar el comportamiento de la sustancia frente a la doble condición impuesta, buscando las condiciones más adecuadas para su implementación, dado que el espesor de la pared determina el volumen final del recipiente e influye en los costos. Así el espesor de la pared es una variable a considerar, junto con las propiedades térmicas del material de cambio de fase y las condiciones de temperatura a las que se deba mantener el producto agrícola.

La elección del espesor de la pared de cambio de fase dependerá entre otros factores del tiempo que se dese almacenar o transportar el producto y del costo económico que implique su implementación. Mientras más grande sea el espesor, más lejos se estará de las condiciones reales de trabajo y mayor será el costo económico de dicha implementación; por ello es importante analizar el efecto de disminuir el espesor. A su vez, a medida que éste sea más pequeño, más limitado se estará en cuanto al tiempo de duración del proceso. Una elección de este factor de 15 a 20 cm después de trabajar con otros valores resulta ser el mas adecuado y dará un punto de equilibrio entre las dos características mencionadas precedentemente. Cabe recordar que los productos agrícolas, una vez listos para el consumo, no pueden permanecer almacenados durante períodos de tiempo superiores a tres días.

RESULTADOS OBTENIDOS

A los efectos de realizar la simulación numérica se ha trabajado con los parámetros térmicos correspondientes al agua, no porque ésta sea la única sustancia a utilizar, sino simplemente para analizar el comportamiento de la pared de cambio de fase, esta sustancia tiene una conductividad térmica ($k=0.61 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$) y una capacidad calorífica ($c_p=4180 \text{ J/kg } ^\circ\text{C}$) relativamente altas, soporta reiterados ciclos de fusión – solidificación, pero debe acondicionarse en forma tal que permita su expansión al solidificarse, por lo que al momento de analizar su utilización deberá tenerse en cuenta este hecho, así como el costo adicional necesario para llevarla a la temperatura de fusión. Cabe aclarar que el modelo de simulación es válido para cualquier sustancia que se elija, solo hay que entrar como datos los correspondientes parámetros térmicos y su temperatura de fusión.

Es interesante observar no sólo las posiciones de las fronteras durante todo el proceso, sino también los perfiles de temperatura de la fase líquida, pues a partir de ellos se puede ver que tan cerca se encuentran físicamente los frentes de fusión y en consecuencia las fronteras.

En la figura 2 se presentan los resultados obtenidos para la posición de la frontera correspondientes a las condiciones de borde de la tabla 1. El espesor de la pared en este caso es de 20 cm.

En la figura 3 se presentan las curvas correspondientes a las mismas condiciones del caso anterior, pero para un espesor de pared de 15 cm. Lógicamente al disminuir el espesor las curvas se aproximen más entre sí, es decir, las fronteras están más próximas en todos los casos.

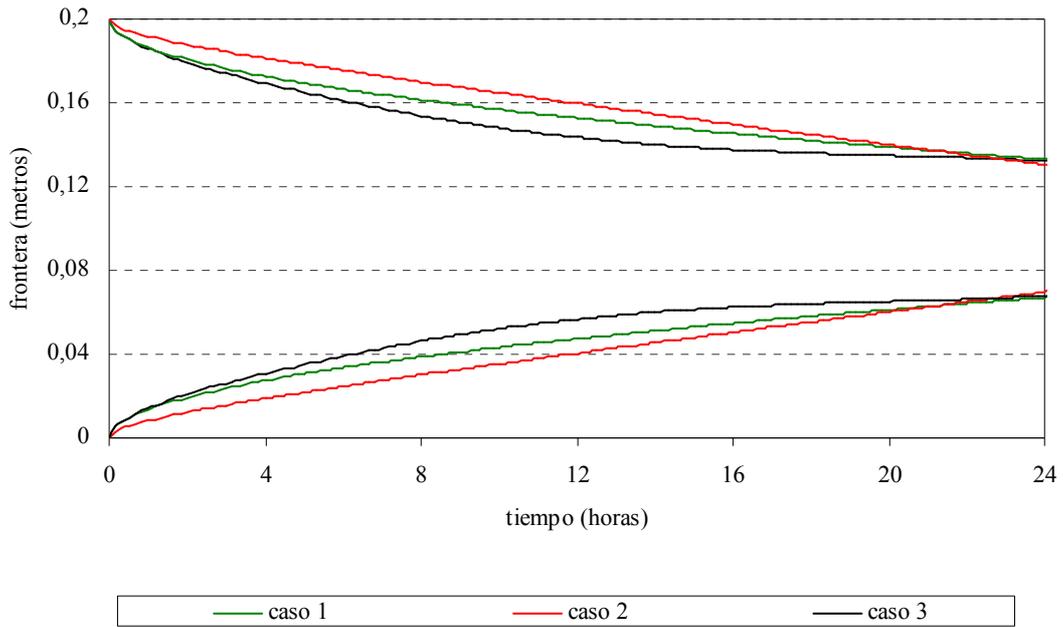


Figura 2: Curvas de frontera libre para un espesor de 20 cm de la pared.

Tanto en la figura 2 como en la 3, se observa que, cualquiera sea la condición de borde elegida, las fronteras por ellas generadas no llegan a juntarse al cabo de 24 horas, lo cual pone de manifiesto la fusión parcial de la sustancia. Lo importante de conocer si las fronteras se juntan o no, está vinculado al tiempo en que se analiza el problema de fusión; en efecto, cuando las fronteras se tocan, desaparece la fase sólida, el material se encuentra totalmente líquido y por tanto, a partir de este momento se tiene una única fase y se está en presencia de un simple problema de transferencia de calor, en el líquido en este caso, lo que no se ha analizado pues ya no involucra cambio de fase. El modelo numérico permite concluir el proceso de trabajo una vez que las dos interfases de separación se juntan. Esto no significa que la sustancia no pueda seguir controlando la temperatura del producto agrícola. Por otra parte, cabe aclarar que puede reciclarse, es decir, volverse a enfriar, para ser reutilizada.

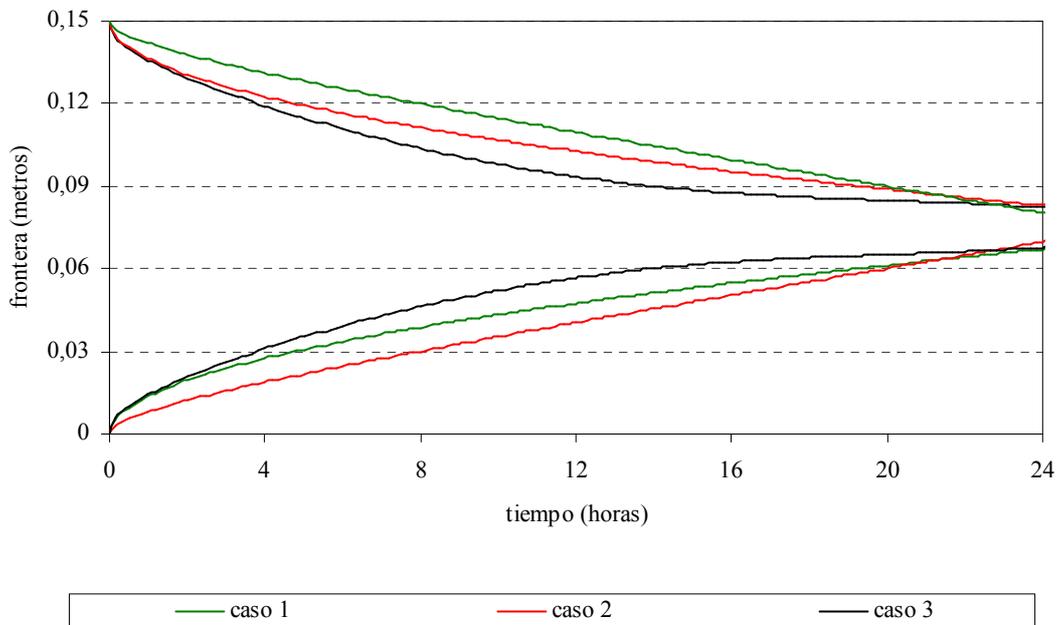


Figura 3: Curvas de frontera libre para un espesor de 15 cm de la pared.

La simetría observada en ambas figuras, entre las curvas de igual color, está de acuerdo con el uso de condiciones iguales en ambos bordes, pero lo interesante de observar es la combinación entre distintas condiciones de borde, ya que cualquier combinación entre ellas es válida, así puede obtenerse información de que sucederá con la frontera para cada situación elegida. Ejemplos de combinaciones posibles se presentan en la tabla 2, donde cada caso corresponde a una dada condición en cada uno de los laterales.

Tabla 2: Doble condición de borde para los extremos de la pared.

Casos Estudiados	Condiciones en ambos bordes (°C)	Comentarios
Caso 1	$T_{b1} = 15$	La temperatura se mantiene constante.
	$T_{b2} = 15 + 10 \cdot \text{sen}(\pi \cdot t / 12,5)$	La temperatura oscila alrededor de 15 °C.
Caso 2	$T_{b1} = t + 5$	La temperatura asciende a partir de 5 °C a razón de 1 °C/hora.
	$T_{b2} = 15 + 10 \cdot \text{sen}(\pi \cdot t / 12,5)$	La temperatura oscila alrededor de 15 °C.
Caso 3	$T_{b1} = 15 + 10 \cdot \text{sen}(\pi \cdot t / 12,5)$	La temperatura oscila alrededor de 15 °C.
	$T_{b2} = t + 5$	La temperatura asciende a partir de 5 °C a razón de 1 °C/hora.

En la figura 4 se muestra la distribución de temperatura en el interior de la pared, que contiene la sustancia de cambio de fase, en ella se puede observar como dichas curvas marcan los límites físicos de las fases presentes en la sustancia. La posición donde cada una de las curvas toca al eje horizontal corresponde al valor de la temperatura de fusión de la sustancia (0 °C en este caso), mientras la fase sólida permanece siempre a dicha temperatura. Estos perfiles, se pueden dibujar para cada instante de tiempo, en la figura se presentan para la hora 12, que corresponde al tiempo medio de evaluación. Se aprecia también diferentes temperaturas iniciales para cada caso, de acuerdo a las distintas condiciones en los bordes citados en tabla 2.

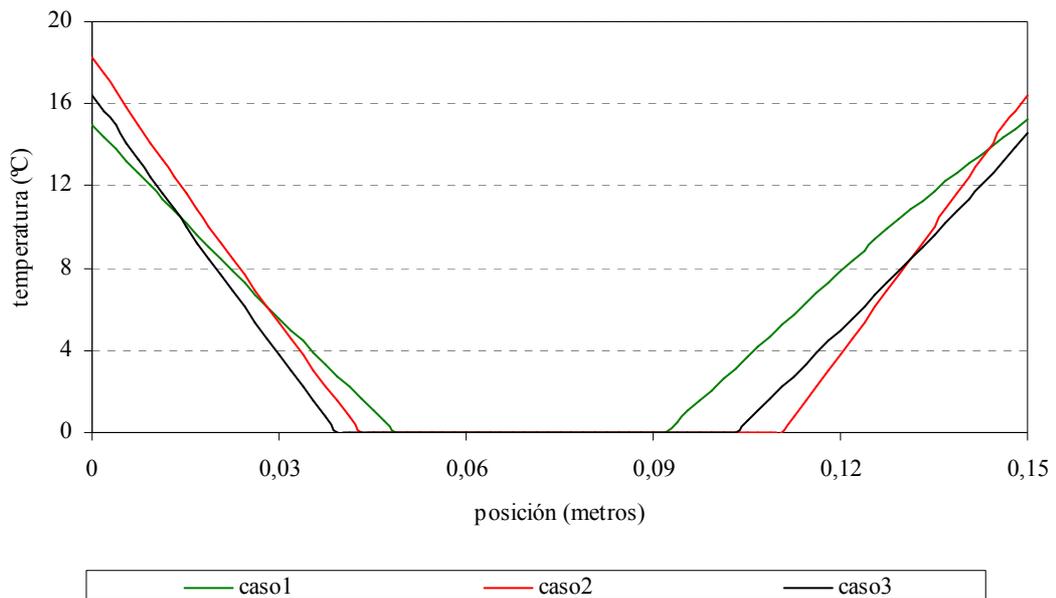


Figura 4: Perfiles de temperatura para las condiciones de la tabla 2.

Si se compara la posición en que cada curva de temperatura de la figura 4 intercepta al eje horizontal, con la posición de la frontera dada en la figura 2, para el mismo tiempo (12 horas), se observa la concordancia de los mismos. Esto se debe a que, cuando la temperatura de la sustancia es de cero grado, la fase líquida se encuentra entre el borde y la posición correspondiente a esta temperatura, la que debe coincidir con la posición de la interfase para ese tiempo.

Dado que, tanto en la figura 2 como en la 3, las fronteras no se juntan, existirá, como ya se dijo, al cabo de todo el proceso sustancia sólida a la temperatura de fusión, por lo que todas los casos presentados en la tabla 1 pueden combinarse entre sí, ya sea en la forma ejemplificada en la tabla 2 o en cualquier otra. Este es un hecho interesante, a la hora de hacer un cálculo rápido para estimar la posición de la interfase y es válido cualquiera sea la sustancia de cambio de fase utilizada.

Los resultados obtenidos muestran que se puede lograr un buen acondicionamiento térmico con un espesor de 15 cm utilizando agua, esta sustancia tiene una conductividad térmica relativamente alta y una capacidad calorífica también elevada en comparación con otras sustancias que puedan utilizarse como es el caso diversas sustancias orgánicas e inorgánicas. Su calor latente de fusión ($L=335$ kJ/kg) es también elevado, por lo que puede inferirse que si con agua es suficiente este espesor, será también bueno cuando se usen otras sustancias de cambio de fase, con parámetros térmicos más pequeños, como es el caso de las grasas orgánicas.

CONCLUSIONES

Los resultados muestran que las sustancias de cambio de fase son muy adecuadas para lograr un buen acondicionamiento térmico tanto de locales destinadas al almacenamiento de productos agrícolas como en envases de dichos productos, para su transporte y distribución, sin que sean éstas las únicas aplicaciones posibles.

Por otra parte, dado que el modelo de simulación numérica es general, resulta sencillo evaluar el comportamiento de la pared de cambio de fase para cualquier sustancia y cualquier condición de borde, sean éstas las aquí presentadas u otras. Este modelo vuelve a mostrar su potencialidad frente a otras condiciones de trabajo, tal como lo son condiciones simultáneas de temperaturas en ambos extremos de la pared.

Al respecto cabe señalar también la posibilidad de trabajar separadamente con ambas fronteras y luego yuxtaponer los resultados, lo cual puede hacerse porque al tratarse de un problema a una fase, el sólido se mantiene siempre a la temperatura de fusión. Esto facilita el tratamiento del problema y su análisis, sobre todo cuando son diferentes las condiciones a las que puede estar sometido un material de cambio de fase y es importante decidir sobre su espesor o sobre la propia sustancia a utilizar.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo se desarrolló en el marco del Proyecto de Investigación N° 1264 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 Villa, L y Lara, L. *Análisis de Sustancias de Cambio de Fase para su Utilización en el Envasado y Transporte de Productos Alimenticios*. VI Congreso Iberoamericano de Aire Acondicionado y Refrigeración (CIAR 2001). Buenos Aires, Argentina, 2001, pág. 640 - 648.
- González, J y Boucíguez, A. *Resolución Numérica del Problema de Stefan a Una Fase. Un Modelo Mejorado*. Comunicación a la XXVII Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente (ASADES), La Plata, Argentina, 2004. Vol. 8, N° 2, pág. 08.01 – 08.02
- Pantásico, B. *Fisiología de la Postrecolección, Manejo y Utilización de Frutas y Hortalizas Tropicales y Subtropicales*. Compañía Editorial Continental, México, 1979.

A PHASE CHANGE MATERIAL WALL USING AS CONTROLLING TEMPERATURE IN THE PACKING OF AGRICULTURAL PRODUCTS.

ABSTRACT: The used of phase change materials for thermal conditioning in the packing of agricultural products, during its transport and storage is presented here. That substance will be contained as integral part of the packing wall of the product, so one of their sides will be in contact with the product and the other with the external ambient. So, there are two boundary conditions: the external ambient temperature and the temperature of the storage agricultural product. The obtained results shows that these materials can absorb the temperatures changes, and they can controlled the temperature of the storage product

KEY WORDS: phase change materials, agricultural product, thermal conditioning.