

DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL Y NUMÉRICA DE PROPIEDADES TÉRMICAS DE GRASAS ORGÁNICAS

Maria Vilte y Angélica Bouciguez
Facultad de Ciencias Exactas. Universidad Nacional de Salta. Av. Bolivia 5150 - 4400 Salta-
Tel. 0387 – 4255424, e-mail: viltem@unsa.edu.ar; bouciga@unsa.edu.ar

RESUMEN: Se presenta el estudio de las propiedades térmicas: densidad, conductividad, difusividad térmica y calor específico de una grasa orgánica que presenta cambio de fase sólido – líquido, a temperatura ambiente. Tales valores son obtenidos experimentalmente en ambas fases con ensayos de calentamiento a partir de sustancia sólida, evaluándolos en función de la temperatura. Asimismo, se realiza una simulación numérica del comportamiento del material utilizando los valores de los parámetros térmicos obtenidos experimentalmente, a los efectos de contar con un algoritmo que permita la predecir el comportamiento de otra sustancia con similares características, se observa una concordancia aceptable entre los resultados numéricos y los experimentales.

Palabras Claves: grasas orgánicas, cambio de fase, temperatura, propiedades térmicas.

INTRODUCCIÓN

Las grasas orgánicas que presentan fusión a temperatura ambiente pueden ser utilizadas como controladores – moderadores de temperatura en recintos que deban mantener tales condiciones, como edificios, invernaderos, secaderos, etc. Este hecho ha sido señalado por diversos autores, quienes observaron que las sustancias orgánicas son más estables que las inorgánicas y soportan un mayor número de ciclos de fusión - solidificación sin alterar significativamente sus propiedades térmicas. (Hasan y Sayigh, 1994; Feldman et al., 1995; Stritih, 2003; Farid et al., 2004)

En trabajos anteriores se ha determinado que estas sustancias son económicamente accesibles y tienen gran disponibilidad en plaza; poseen además una temperatura de fusión y calor latente que hace interesante su estudio desde el abordaje experimental. (Bouciguez y Lara, 2005; Vilte y Bouciguez, 2007).

En esta línea y continuando con el estudio experimental se presenta la caracterización de grasas orgánicas de origen animal, esencialmente grasa bovina; estudiando sus propiedades térmicas que son fundamentales en el proceso de transferencia de calor con cambio de fase. Para ello, se la sometió a ciclos de calentamiento - enfriamiento que involucran variaciones de temperatura en el rango de 20 a 70°C; hecho que permitió registrar el comportamiento de las muestras tanto en estado sólido como líquido, ya que dichas sustancias presentan fusión alrededor de los 37°C.

La determinación de la dependencia de la conductividad, la difusividad térmica y el calor específico con la temperatura resulta útil en la selección y caracterización de los materiales.

DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

Para la determinación de la densidad se emplearon una probeta de 10 ml de capacidad, en la que se colocó la muestra, para su pesada una balanza de triple brazo OHAUS de 0.1 g de apreciación.

En el caso de la determinación de la conductividad térmica, la difusividad y el calor específico, se realizaron experiencias de ciclos de calentamiento y enfriamiento de la sustancia para diferentes potencias de calentamiento. A fin de medir dichas propiedades térmicas se colocaron sensores de temperatura, específicamente pares termoeléctricos de cobre - constantan, tipo T, norma NBS. El registro de las temperaturas se realizó cada 30 segundos con 2 módulos ADAM que conectados a una computadora y empleando un programa sencillo en QBasic, permite obtener los registros térmicos en un archivo de texto para su posterior procesamiento.

El calentamiento se realizó utilizando un calefactor, aislado térmicamente en su parte inferior, que consta esencialmente de una resistencia $R=20 \Omega$ y demás elementos que le dan rigidez, uniformidad, conectado a una fuente de tensión constante V , lo que permite obtener una potencia de calentamiento constante dada por $P=V^2/R$. Una plancha de hierro de 4 mm de espesor colocada entre el calefactor y la superficie del recipiente que contiene la muestra, uniformiza el flujo de calor suministrado. La sustancia está contenida en un recipiente de base rectangular, construido en vidrio flotado (float) de 3 mm de espesor de las siguientes dimensiones: ancho $a=16.3$ cm; alto $h=14.8$ cm; espesor $e=9.4$ cm; la muestra alcanza una altura de 2.8 cm en el mismo; se aislaron los laterales del recipiente en la región ocupada por la sustancia para evitar pérdidas de calor al ambiente. Una vez nivelados los elementos, partiendo de sustancia sólida alrededor de 17 °C, se inicia el calentamiento; elevándose la temperatura de la sustancia, la que al cabo de cierto tiempo inicia el proceso de fusión. Una vez fundida toda la

muestra se corta el calentamiento y se registra el proceso de enfriamiento. El equipo completo de utilizado en la mediciones se muestra en la Figura 1, mientras que detalles de la muestra se presentan en la Figura 2.

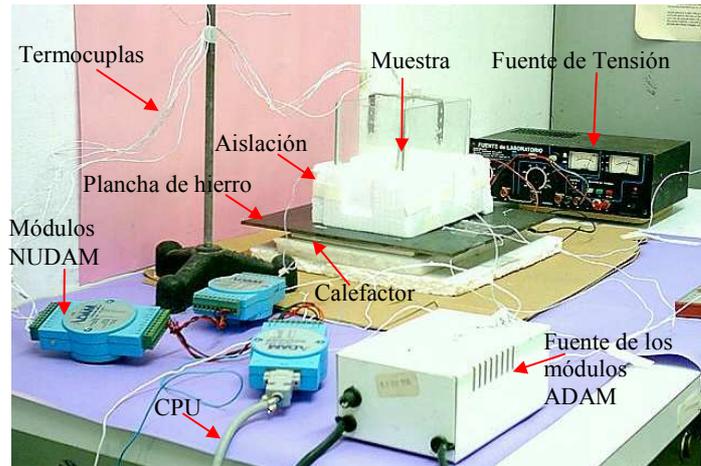


Figura 1. Dispositivo experimental para el registro de las medidas en un ciclo de calentamiento-enfriamiento de una grasa.

En la Figura 2 se visualiza con mayor claridad la disposición de los sensores de temperatura: T_{amb} registra la temperatura ambiente, T_{cal} la temperatura en la superficie lateral del calefactor, T_{plair} la temperatura de la placa de hierro en contacto con el ambiente, T_{plais} la temperatura de la placa bajo la aislación de poliestireno expandido, esto es, la temperatura debajo de la superficie del recipiente. Tres sensores dentro de la muestra que guardan entre si una distancia de 1 cm, registran las temperaturas en el interior de la sustancia a distintas alturas; T_{fon} registra la temperatura de la grasa a 0,4 cm del fondo del recipiente, T_{sup} registra la temperatura a 0,4 cm de la superficie de la muestra y T_{med} registra la temperatura entre los dos sensores anteriores; T_{aire} registra la temperatura del aire próxima a la superficie libre de la muestra, a unos 5 mm aproximadamente de su superficie libre.

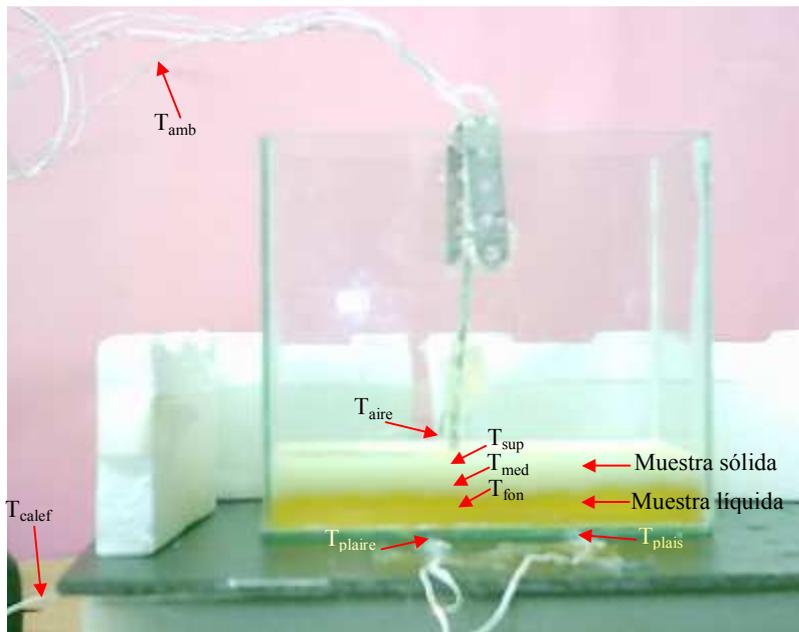


Figura 2. Disposición de las termocuplas en la muestra donde se visualiza interfase sólido-líquido del material.

Cabe señalar, que aunque sería deseable contar con un número mayor de registro de datos en el interior del material de cambio de fase, colocar más termocuplas ocasiona un aumento local en la temperatura y altera el valor que se desea registrar.

DETERMINACION DE LOS PARAMETROS TERMICOS

Densidad: La densidad de la sustancia de cambio de fase fue determinada por pesada. Para ello, se utilizó una probeta de área unidad y 10 ml de capacidad, que fue llenada con sustancia líquida enrasada a una altura de 7 ml, de manera que se lea claramente en la escala del recipiente; se espera que alcance el estado sólido y se realiza el masado. Se masa primero el recipiente solo y luego con la muestra incorporada, la masa de la sustancia se determina por diferencia. La altura se lee en la probeta. La densidad se obtiene de la ecuación (1)

$$\delta = \frac{m}{V} \quad (1)$$

La masa del recipiente medida es de $13.60 \pm 0,05$ g. La masa de la probeta más la muestra es de 20.00 g, por lo que la muestra tiene una masa de 6.40 g, de modo que la densidad obtenida está dada por (2)

$$\delta_{grasa} = (914.2 \pm 0.2) \frac{kg}{m^3} \quad (2)$$

A esta escala no se observan diferencias apreciables entre el volumen de la muestra en el estado sólido y el líquido. Esto significa que no existen discrepancias significativas entre el volumen ocupado por el líquido y el sólido de la misma masa, lo que es altamente beneficioso en el momento de colocar la sustancia de cambio de fase en los contenedores, para el acondicionamiento térmico deseado.

Conductividad térmica, difusividad y calor específico: Se realizaron experiencias que permiten medir temperaturas y flujos de calor, lo que implica contar con la información necesaria para la evaluación de estos parámetros térmicos. (Banaszkiwics et al, 1995; Arderius et al, 1996; Tarzia, 1998)

Se utilizaron distintas potencias de calentamiento en sendos ensayos, ellas fueron de 11.25 W, 20 W, 31.25 W y 45 W. En la Figura 3 (a) y (b) se muestra la evolución temporal del perfil de temperaturas registrado durante las experiencias. En la parte (a) la potencia aplicada es constante de 31.25 W, siendo el tiempo requerido para que toda la sustancia alcance el estado líquido de aproximadamente 4.5 horas; partir de este momento las temperaturas dentro de la sustancia alcanzan un valor casi constante, en forma de meseta y la sustancia se encuentra completamente líquida. En la fase líquida, dentro de la muestra, el valor de temperatura tiende a uniformizarse, por lo que las temperaturas del fondo y el medio son muy próximas; la temperatura cercana a la superficie de la muestra (T_{sup}) en contacto con el ambiente más frío es algo menor. Luego aproximadamente a las 2 horas se suprime la potencia de calentamiento y se espera que la muestra alcance el valor de la temperatura ambiente. En la parte (b), la potencia inicial de calentamiento es de 20 W, el proceso de fusión avanza muy lentamente durante las primeras 7 horas, a partir de allí se incrementa la potencia aplicada a 31.25 W; 2 horas después toda la muestra está fundida; se observa que se requieren entre 6 y 7 horas para que la sustancia alcance la temperatura ambiente.

En todas las experiencias se esperó que la sustancia licuara completamente, permitiéndole además que elevara su temperatura en 15 a 20 °C por encima de la de fusión antes de cortar el calentamiento, a los efectos tener la seguridad de que ella se encontraba totalmente líquida y lejos de la región de cambio de fase, para realizar la evaluación de los parámetros térmicos.

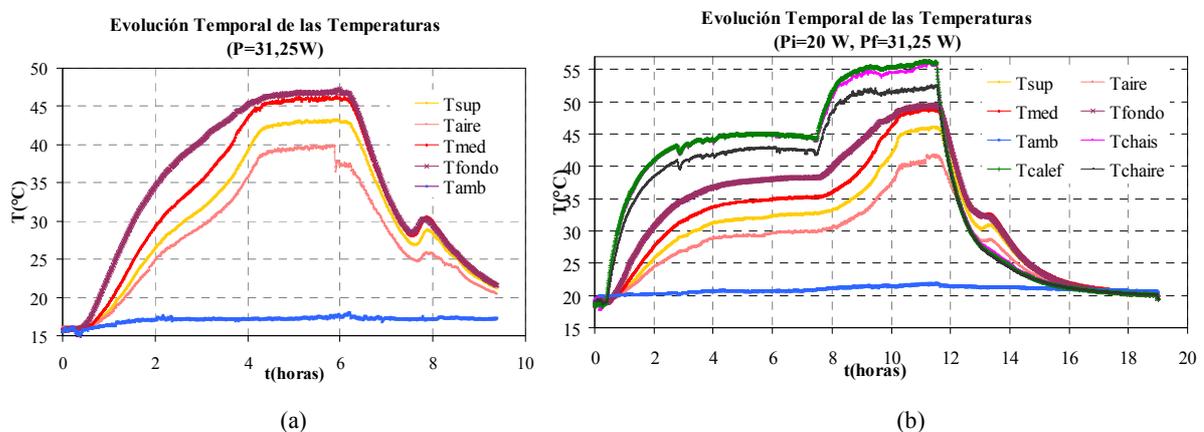


Figura 3: Evolución Temporal de las temperaturas en un ciclo de calentamiento - enfriamiento de una grasa.

Para la determinación de la conductividad térmica, se empleó la Ley de Fourier de transmisión del calor por conducción a través de la muestra, cuya expresión es la ecuación (3)

$$q = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (3)$$

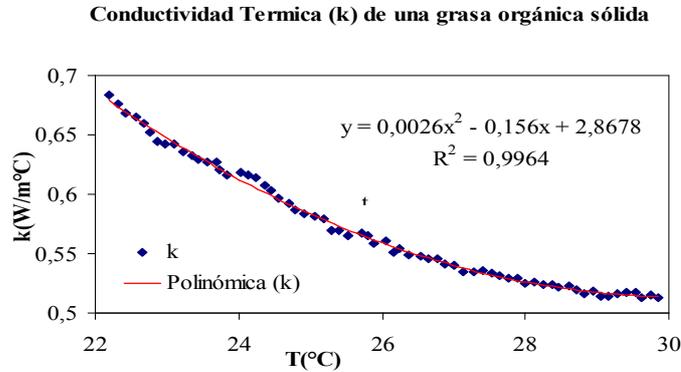
Donde k es la conductividad del material de cambio de fase, $\Delta T = T_{fon} - T_{med}$ es la diferencia entre los dos valores de temperatura medidos dentro de la muestra y Δx es la distancia entre los correspondientes sensores ($|\Delta x| = 1$ cm); A es el área total que recibe el calor, igual a 0.09 m². El flujo de calor q , se determina a través de la potencia eléctrica aplicada $P = V^2/R$.

A los efectos de determinar las conductividades en ambas fases, se consideraron valores de en el rango de temperaturas entre 22 °C a 30 °C para la fase sólida y por encima de los 43 °C en la fase líquida, para asegurarse evitar la zona en alguna parte de la sustancia se encuentra realizando el cambio de fase. De los valores de conductividad obtenidos en este rango de temperaturas se puede estimar un valor promedio para el sólido y líquido dado por las ecuaciones (4) y (5) respectivamente.

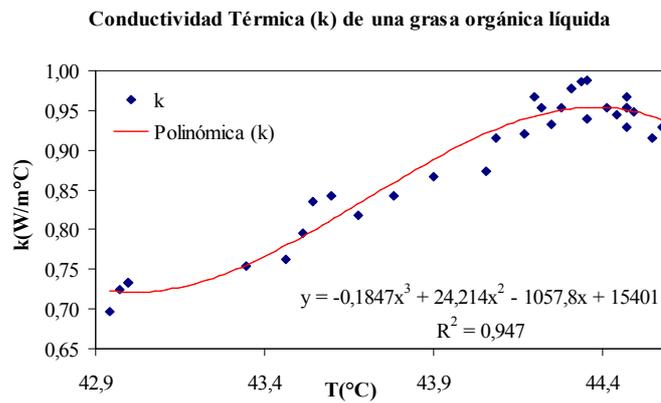
$$k_s = (0.57 \pm 0.01) \frac{W}{^\circ C m} \quad (4)$$

$$k_l = (0.95 \pm 0.01) \frac{W}{^\circ C m} \quad (5)$$

La Figura 4 (a) y (b) muestra los valores de k en función de la temperatura para la fase sólida y líquida respectivamente. Se observa que la conductividad térmica presenta una dependencia polinómica con la temperatura en el interior de la muestra en los rangos considerados.



(a)



(b)

Figura 4. Conductividad térmica en función de la temperatura de la muestra para la fase sólida y líquida de la sustancia.

La difusividad térmica (a) y la capacidad calorífica (c_p) de una sustancia se encuentran relacionadas por la ecuación (6)

$$a = \frac{k}{c_p \rho} \quad (6)$$

Físicamente, a indica como fluye el calor por el material: cuanto más alto es su valor, mayor es el ritmo de propagación del perfil de temperatura. Es decir, a relaciona flujo de energía con gradiente de temperatura, por lo que en vistas a determinar el calor específico de la sustancia, se calculó en primer lugar la difusividad térmica empleando la conocida ecuación de difusión del calor, expresada por (7), en la que $T(x,t)$ es la temperatura, función de la coordenada espacial, x y la temporal t .

$$\frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} \quad (7)$$

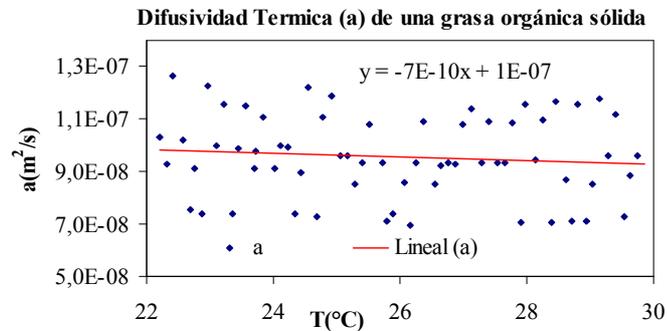
De las experiencias se conoce la evolución temporal de la temperatura en tres puntos espacialmente diferentes ubicados sobre una misma línea de flujo térmico, por lo que digitalizando esta ecuación resulta la expresión (8) donde el primer índice indica variación espacial y el segundo la temporal, siendo $\Delta t=30$ seg. y $\Delta x=1$ cm.

$$\frac{T(x,t+\Delta t) - T(x,t)}{\Delta t} = a \frac{[T(x+\Delta x,t) - 2T(x,t) + T(x-\Delta x,t)]}{\Delta x^2} \quad (8)$$

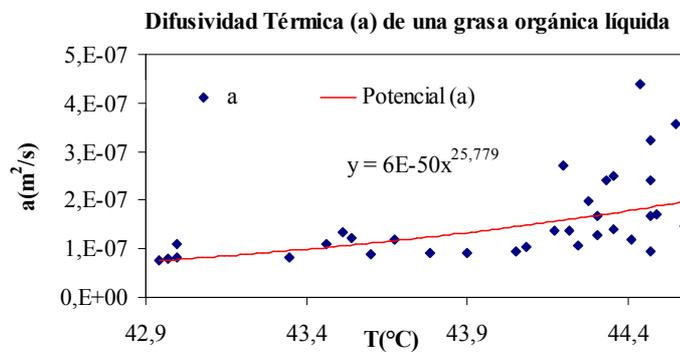
En la Figura 5 (a) y (b) se presenta los valores de la difusividad térmica obtenidos en rango de temperaturas considerado para las fases sólida y líquida respectivamente. Si bien los valores obtenidos presentan una dispersión importante, oscilan alrededor de un valor medio dado por (9) para el sólido y (10) para el líquido respectivamente.

$$a_s = (9 \pm 1) \cdot 10^{-8} \frac{m^2}{s} \quad (9)$$

$$a_l = (1.6 \pm 0.9) \cdot 10^{-7} \frac{m^2}{s} \quad (10)$$



(a)



(b)

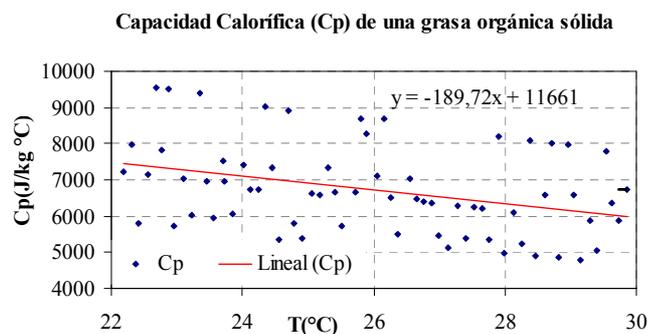
Figura 5. Difusividad térmica en función de la temperatura de la muestra para la fase sólida y líquida de la sustancia.

A partir de la ecuación (6) se calcula la capacidad calorífica, cuyos valores promedios para sólido y líquido se obtienen de las ecuaciones (9) y (10), resultando expresados por las ecuaciones (11) y (12) respectivamente

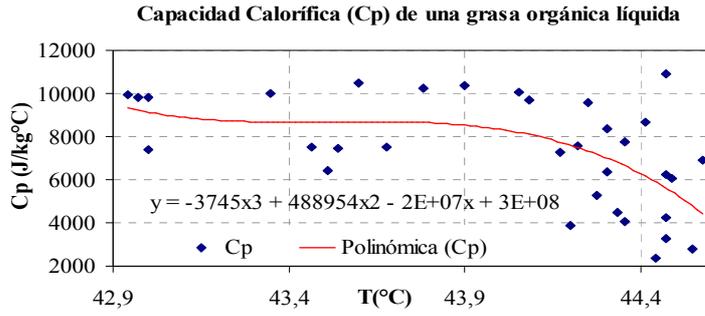
$$c_{ps} = (6 \pm 1) \cdot 10^3 \frac{J}{kg^{\circ}C} \quad (11)$$

$$c_{pl} = (7 \pm 2) \cdot 10^3 \frac{J}{kg^{\circ}C} \quad (12)$$

En la Figura 6 (a) y (b) se aprecian los valores de la capacidad calorífica calculados para las fases sólida y líquida de la grasa orgánica considerada.



(a)



(b)

Figura 6. Capacidad Calorífica en función de la temperatura de la muestra para la fase sólida y líquida de la sustancia.

MODELO NUMERICO Y SIMULACION

Con el fin de evaluar completamente el comportamiento de las sustancias de cambio de fase y considerando que contar con un modelo numérico resulta útil para determinar lo que sucedería en situaciones similares, se ha realizado una simulación mediante un programa sencillo en lenguaje *Matlab*; el mismo utiliza el modelo entálpico, (Zerroukat y Chatwin, 1994) que mediante el cálculo de la entalpía $h(x,t)$, permite determinar la distribución de temperaturas y la fracción de líquido $fr(x,t)$ presente en la muestra obteniéndose, con este último valor la posición de la interfase $s(t)$. Las expresiones utilizadas para este método se detallan en las ecuaciones (13) a (16)

$$\frac{\partial h(x,t)}{\partial t} + \text{div}[q(x,t)] = 0 \quad t > 0 \quad (13)$$

$$T(x,t) = \begin{cases} T_f, & 0 < h < \rho \cdot L \\ T_f + \frac{h(x,t) - \rho \cdot L}{\rho \cdot c}, & h \geq \rho \cdot L \end{cases} \quad \forall t > 0 \quad (14)$$

$$fr(x,t) = \begin{cases} \frac{h(x,t)}{\rho \cdot L}, & 0 < h < \rho \cdot L \\ 1, & h \geq \rho \cdot L \end{cases} \quad (15)$$

$$s(t) = \Delta x \cdot \sum fr(x,t) \quad (16)$$

Siendo las condiciones iniciales y de contorno las planteadas en la experiencia. En estas ecuaciones se presenta un modelo puramente conductivo, el mismo representa el comportamiento real de la sustancia de cambio de fase, ya que no existen efectos convectivos, tal como puede apreciarse en la Figura 2, donde se observa que al recibir calor desde la base, la sustancia comienza a fundirse quedando el líquido por debajo del sólido; esto demuestra que no hay convección.

Esta situación podría llevar a pensar que la sustancia presenta un comportamiento anómalo, similar al del agua, hecho que se descarta en función de estudios previos realizados (Vilte y Bouciguez, 2007) donde se ha observado que si la sustancia es calentada desde la parte inferior el líquido permanece por debajo del sólido, mientras que si recibe calor desde la parte superior, el líquido permanece por encima del sólido. Asimismo, si recibe calor desde un lateral la interfase líquido – sólido se desplaza hacia el lateral opuesto prácticamente sin distorsión.

Se ha modelizado la situación correspondiente a una potencia de 45 W, la distribución de temperatura en la sustancia de cambio de fase, obtenidas de la experiencia se presentan en la Figura 8. Se ha elegido esta distribución para verificar el valor de los parámetros térmicos obtenidos en las experiencias presentadas en la Figura 3.

Al respecto de tales valores, cabe acotar que si bien se observa cierta dispersión en los valores de los coeficientes térmicos, la curva de ajuste tomada de los datos experimentales y aplicada luego al modelo numérico responde adecuadamente dando lugar a resultados aceptables en comparación con los experimentales.

En la Figura 9 se presentan los resultados obtenidos en la simulación numérica, la parte (a) corresponde a la distribución de temperaturas y la (b) a la posición de la interfase. El valor del calor latente de fusión L se consideró igual a 100 kJ/kg, que es un valor aceptable para las grasas orgánicas. (Swet, 1981)

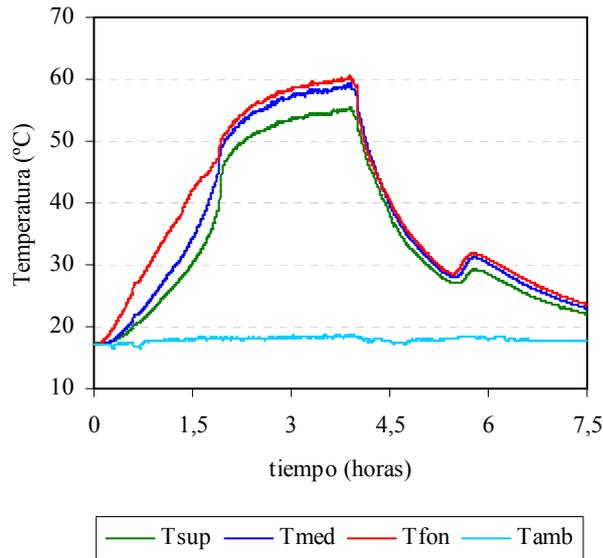


Figura 8: Resultados experimentales para un flujo de calor de 45 W.

De la comparación de la simulación numérica con los datos experimentales, se observa un buen acuerdo en la parte correspondiente al calentamiento, mientras que en el período durante el cual la sustancia se enfría por contacto con el ambiente, si bien las temperaturas se solapan, al igual que ocurre en la experiencia, el orden de ellas se ve alterado, aún así es de destacar que la diferencia existente entre éstos valores es muy pequeña.

En la parte experimental se observa, alrededor de los 30 °C durante el proceso de enfriamiento, un período durante el cual la sustancia eleva unos pocos grados su temperatura y luego retoma el ritmo de decrecimiento. Se han realizado diversas experiencias y en todas aparece este efecto, el que se estima se debe a la presencia de humedad ambiente que queda en pequeñas gotitas encerrada en el material de cambio de fase. Al utilizar las temperaturas como condiciones de borde en la simulación este efecto se repite en ella. Se pretende continuar con el estudio y extenderlo a otras sustancias con el fin de poder observar o no su presencia y explicarlo mejor.

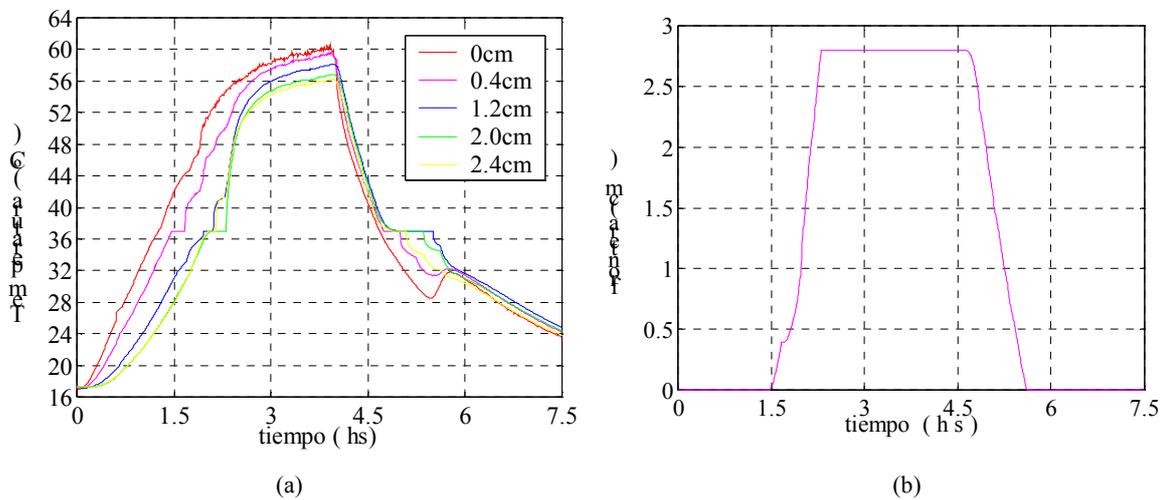


Figura 9: Resultados obtenidos en la simulación numérica.

CONCLUSIONES

La determinación numérica de los coeficientes térmicos se realiza en forma sencilla y permite obtener los parámetros que caracterizan a la sustancia de cambio de fase, ya que si bien los mismos podrían obtenerse de bibliografía, los valores allí consignados corresponden a sustancias puras, que no es el caso de las que normalmente se utilizan en la práctica. En efecto a los fines prácticos se utilizan sustancias comerciales, por su disponibilidad y costo, ya que las puras, son extremadamente caras y además al ser grasas absorben rápidamente el polvo y partículas del ambiente, por lo que se contaminan rápidamente dejando de ser puras en el momento mismo de su utilización y por supuesto en sucesivos empleos.

Se observa que si bien algunos parámetros térmicos presentan dispersión en las medidas, la curva que los ajusta se encuentra en los valores medios. Esta expresión ha sido usada en la simulación numérica del comportamiento de la misma grasa en otra experiencia arrojando resultados aceptables al realizar la comparación entre los valores experimentales y los obtenidos de la simulación.

El desarrollo de un modelo de simulación, permite contar con una herramienta adecuada para la determinación rápida del comportamiento de cualquier otra sustancia o el estudio de otras situaciones. Ella permite introducir valores de temperatura o de flujo de calor, como condición de contorno, conjuntamente con los parámetros térmicos de la sustancia a analizar. Asimismo; permite también obtener algunos parámetros si se conocen las correspondientes condiciones externas a las que está sometido. Por otra parte, conociendo las condiciones de operación y alguno de los parámetros térmicos de la sustancia de cambio de fase, permite la determinación de otros.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado en el marco del Proyecto de Investigación N° 1554, del Consejo de Investigaciones de la Universidad Nacional de Salta, a quien se agradece su financiamiento.

REFERENCIAS

- Arderius, J.; Lara, M.; Tarzia, D. (1996). Experimental Numerical Determination of Thermal Coefficients Through A Phase Change Process. *Int. Comm. Heat Mass Transfer*, Vol. 23, N° 5, pp. 745 – 754.
- Banaszkiewicz, M, Seiferlin, K y Komle, M. (1997). A new method for the determination of thermal conductivity and thermal diffusivity from linear heat source measurements, *Rev.Sci. Instr.*, 68, 4184-4190.
- Bouciguez, A y Lara, M. (2005). Una Pared de Cambio de Fase para Controlar Temperaturas de Productos Agrícolas. *Energías Renovables y Medio Ambiente, Revista de la Asociación Argentina de Energía Solar.*, Vol. 16, pág. 29 - 33. ISSN 0328-932X.
- Farid, M; Khudhair, A; Razack, S; Al-Hallaj, S. (2004). A Review on Phase Change Energy Storage: Materials and Applications. *Energy Conversion and Management* 45, 1597 – 1615.
- Feldman, D; Banu, D; Hawes, D. (1995). Low Chain Esters of Stearic Acid as Phase Change Materials for Thermal Energy Storage in Building. *Solar Energy Materials and Solar Cells.* 36, 311 – 322.
- Hasan, A.; Sayigh, A. (1994). Some Fatty Acids as Phase Change Thermal Energy Storage Materials. *Renewable Energy*, Vol. 4, N° 1, pp. 69 – 76.
- Lamberg, P; Lehtiniemi, R; Henell A. (2004). Numerical and Experimental Investigation of Melting and Freezing Processes in Phase Change Material Storage, *International Journal of Thermal Sciences*, 43, 277 – 287.
- Stritih, U. (2003). Heat Transfer Enhancement in Latent Heat Thermal Storage System for Building. *Energy and Building*, 35, pp 1097 – 1104.
- Swet, Ch. (1981). *Energy Storage for Solar Applications*. Cap. 6. *Solar Energy Handbook*. J. Kreider and F. Kreith. Mc Graw Hill Book Company.
- Tarzia, D. (1998). The Determination of Unknown Thermal Coefficients Through Phase Change Process with Temperature Dependent Thermal Conductivity. *Int. Comm. Heat Mass Transfer*, Vol. 25, N° 1, pp. 139 – 147.
- Vilte, M y Bouciguez, A. (2007). Estudio Experimental del Comportamiento Térmico de Grasas Organicas.. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, pp. 25-30. Vol. 11. Impreso en la Argentina. ISSN 0329-5184.
- Zerroukat, M; Chatwin, C. (1994). *Computational Moving Boundary Problems*. Research Studies Press LTD. John Wiley & Sons. England.

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL DETERMINATION OF THERMAL PROPERTIES OF ORGANIC FATS

ABSTRACT: The study of the thermal properties: density, conductivity, thermal diffusivity and specific capacity of an organic fat is presented here. This substance has its melting point at room temperature. The values of the mentioned properties are obtained through a test where temperatures and flux of heat are measured. In addition, a numerical simulation is made too with the purpose of having an algorithm, which can be used in similar situations. An acceptable concordance between the experimental and numerical results is observed.

Keywords: organic fats, phase change, temperature, thermal properties.