

ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS TÉRMICOS DE UNA GRASA POR UN MÉTODO DE SOLUCIÓN DE PROBLEMA INVERSO

ESTIMATION OF THERMAL PARAMETERS OF A FATTY MATTER BY AN INVERSE PROBLEM SOLVING METHOD

Ricardo F. Lozano y María del S. Vilte

*Universidad Nacional de Salta, Avda. Bolivia 5150, Salta, Argentina,
lozano.r.fed@gmail.com, mvilte88@gmail.com, <http://www.unsa.edu.ar>*

Palabras clave: Propiedades térmicas, problema inverso, conducción de calor, grasa orgánica.

Resumen. Se presenta un método para estimar la conductividad y difusividad térmicas, de una muestra de grasa orgánica en estado sólido, a partir de mediciones de temperatura y flujo de calor, aplicando una técnica de solución de problema inverso de conducción de calor. El método consiste en la minimización de la suma de cuadrados de las diferencias entre las temperaturas medidas y estimadas (solución del problema directo). La técnica de solución conduce a un algoritmo computacional iterativo que se tradujo en un programa en el lenguaje WolframMathematica para obtener los resultados numéricos. Para comprobar la implementación del algoritmo se ejecutó con mediciones simuladas de temperatura para una sustancia hipotética sometida a un flujo de calor y con propiedades térmicas dados. Además con el método de problema inverso se implementó un programa que estima el flujo de calor para valores de conductividad y difusividad conocidos, que al ejecutarlo con los valores obtenidos numéricamente, se obtuvo un valor compatible con el medido. Finalmente con los valores obtenidos numéricamente, se determinó un valor de calor específico de la grasa.

Keywords: Thermal properties, inverse problem, heat conduction, organic fat.

Abstract. In this paper, a method to estimate the thermal conductivity and diffusivity of a sample of organic fat in solid state is presented, from measurements of temperature and heat flow, applying a solution technique of inverse heat conduction problem. The method consists in the minimization of the sum of squares of the differences between the measured and estimated temperatures (solution of the direct problem). The solution technique leads to an iterative computational algorithm that was translated into a program in the Wolfram Mathematica language to obtain the numerical results. To verify the algorithm and its implementation, it was executed with simulated temperature measurements for a hypothetical substance with a heat flow and known thermal properties. In addition, with the inverse problem method, a program that estimates the heat flow for known conductivity and diffusivity values was implemented, which when executed with the values obtained numerically, obtained a value compatible with the measured value. Finally, with the values obtained numerically, a specific heat value of the fat was determined.

1 INTRODUCCIÓN

El creciente consumo de energía ha llevado inevitablemente al agotamiento y escasez de los recursos de combustibles fósiles, así como un aumento en el calentamiento global en las últimas décadas. Estos efectos han atraído la mirada hacia las fuentes de energías renovables, como la energía eólica y la energía solar, como alternativas a las fuentes convencionales. Los sistemas de almacenamiento de estos tipos de energía se han desarrollado en los últimos años como una opción prometedora para proporcionar energía más limpia y segura. Los sistemas de almacenamiento de calor latente han recibido considerables atención recientemente debido a su capacidad para proporcionar alta densidad de almacenamiento de energía, en un lapso de tiempo en el que la sustancia presenta un comportamiento isoterma. Se han encontrado numerosas aplicaciones en áreas tales como almacenamiento de alimentos, calefacción y refrigeración de edificios (aplicaciones domésticas) y refrigeración. Al elegir materiales de almacenamiento adecuados conocidos como materiales de cambio de fase (PCM), grandes cantidades de energía térmica puede ser absorbida durante la fusión o liberada durante procesos de solidificación. Para evaluar el comportamiento de una sustancia como material de cambio de fase, es necesario caracterizarlo, determinando las propiedades físicas que lo definen como un PCM adecuado, entre las que se destacan la conductividad y la difusividad térmica. Sin embargo, la caracterización de dichas propiedades no siempre es fácil, sobre todo para materiales compuestos, como es el caso de una sustancia que no es pura como la grasa vacuna. En la literatura uno puede encontrar algunas expresiones que nos permiten estimar el valor de dichas propiedades, pero estas no resultan muy adecuadas porque su composición se conoce en forma aproximada.

Por otro lado como ya se ha venido trabajando desde hace algún tiempo con esta sustancia en forma experimental, se ha planteado el diseño un ensayo experimental a fin de obtener medidas de la distribución de temperaturas en el interior de la misma cuando es sometida a ciclos de calentamiento-enfriamiento, que sean empleadas para determinar la conductividad y difusividad térmicas. El método de resolución de problemas de calor inverso ofrece esta posibilidad.

Los problemas inversos de transferencia de calor se basan en la medición de temperaturas en el interior y/o flujo de calor en borde de un material, para la estimación de cantidades desconocidas que están incluidas en el análisis de problemas térmicos. En tanto que en un problema clásico directo de conducción de calor, el flujo de calor en el borde y las propiedades termofísicas de un material se suponen conocidos y se busca determinar el campo térmico en el mismo. Desde un punto de vista matemático los problemas inversos están mal planteados debido a la falta de estabilidad y a la no linealidad de los mismos. Los métodos de resolución de un problema inverso requieren la solución del problema directo lo que se puede realizar en forma numérica o si la situación lo permite, adaptar la disposición experimental para usar una solución analítica. En cualquier caso es necesario atender los dos aspectos, teórico y experimental. Los métodos de resolución de problema inverso permiten estimar funciones que dependen del tiempo y parámetros que dependen de la temperatura. El método usado en este trabajo para determinar la conductividad y la difusividad térmicas requiere la solución del problema directo, o sea el campo de temperatura para conducción unidimensional de calor a lo largo de la sustancia sólida modelada como una barra de sección transversal circular con flujo de calor superficial constante en uno de los extremos donde las propiedades térmicas de la misma no dependen de la posición ni de la temperatura.

2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

2.1 El problema directo.

Consideramos el problema de *conducción unidimensional* de calor dependiente del tiempo, en un sólido semi-infinito ($x > 0$). El sólido inicialmente a temperatura T_0 es sometido a un flujo de calor constante q'' en el borde $x = 0$ para tiempo $t > 0$.

El problema resulta descrito por las ecuaciones (1) a (3) (Bejan A., 1993), cuya incógnita $T(x,t)$ es el campo de temperatura en el sólido. $T(x,t)$ es la temperatura en una superficie isotérmica, plano perpendicular al flujo de calor, en la posición x y en el instante t . Los parámetros físicos del material de cambio de fase son: ρ la densidad, k la conductividad térmica, c el calor específico y $\alpha = k/(\rho c)$ la difusividad térmica.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad t > 0, \quad x > 0 \quad (1)$$

$$T(x, 0) = T_0 \quad x > 0 \quad (2)$$

$$q'' = -k \frac{\partial T}{\partial x} (0, t) \quad t > 0 \quad (3)$$

La ecuación (1) es la de difusión en el sólido, la (2) es la condición inicial y la (3) es la condición de borde. La solución está dada por:

$$T(x, t) = T_0 + 2 \frac{q''}{k} \left(\frac{at}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{x^2}{4at}\right) - \frac{q''}{k} \operatorname{erfc}\left[\frac{x}{2(at)^{1/2}}\right] \quad (4)$$

2.2 El problema inverso.

Se considera un problema similar al dado por las ecuaciones (1), (2) y (3) pero en el cual la conductividad (k) y la difusividad (α) son desconocidas mientras que T_0 y q'' están especificadas. Se busca determinar los parámetros k y α , para lo cual se cuenta con las temperaturas medidas en los puntos interiores del sólido en diferentes tiempos sobre el intervalo ($0 < t < t_f$) donde el tiempo final t_f (30 minutos) se determinó con la condición de que la temperatura en el borde sea menor que la temperatura de fusión cuyo valor está alrededor de los 40 °C. Se denotan con Y_{im} , las temperaturas medidas en los puntos interiores del sólido en los tiempos t_i ($i = 1, \dots, I$) y en las posiciones x_m ($m = 1, \dots, M$), donde M es el número de sensores, I es el número de medidas tomadas por cada sensor, en nuestro caso $I = 16$ y $M = 5$.

Las unidades de las magnitudes empleadas en este trabajo, están dadas en el sistema internacional (SI). La temperatura T , en °C; la posición x en metros (m); el tiempo en segundos (s); la densidad de flujo de calor q'' , en W/m^2 ; la difusividad térmica α en m^2/s ; la conductividad térmica k en $W/m \cdot ^\circ C$.

3 MODELO DE CÁLCULO

3.1 Algoritmo computacional

La solución de este problema está basada en la minimización de la norma de cuadrados mínimos ordinaria S , dada por:

$$S(k, \alpha) = \sum_{m=1}^5 \sum_{i=1}^{16} [Y_{im} - T_{im}(k, \alpha)]^2 \quad (5)$$

Y requiere el cálculo de la matriz de sensibilidad J cuyos elementos se conocen como

los coeficientes de sensibilidad, definidos por:

$$J_{kj} = \frac{\partial T_k}{\partial P_j} \quad k = 1, \dots, (I - 1)M + Mj = 1, \dots, N \quad (6)$$

donde P_j denota un parámetro desconocido y N es el número de parámetros. En nuestro caso $N = 2$, $P_1 = k$ y $P_2 = \alpha$. Los subíndices k y j se refieren al número de filas y número de columnas de la matriz de sensibilidad respectivamente. El número de filas k está relacionado a la medida temporal t_i y al sensor m por la expresión, $k=(i-1)M+m$.

Cuando esta matriz no es función de P_j , el problema se denomina lineal en este parámetro. En el caso de un problema inverso no lineal, la matriz de sensibilidad tiene una dependencia funcional en los parámetros desconocidos P_j . En ambos casos la resolución del problema requiere que la matriz $(\mathbf{J}^T \mathbf{J})$ sea no singular.

El método permite en principio la determinación de N parámetros si se cuenta con medidas suficientes, en este caso se podría abordar la determinación simultánea de los tres parámetros k , q'' y α . Pero se observó que el valor de q'' se mantenía sin cambio en la conjetura inicial ($k=0.6, q''=400, \alpha=5 \times 10^{-6}$), como se muestra en la Tabla 1.

Iteración	k (conductividad)	q'' (densidad de flujo de calor)	α (difusividad)
10	0,6	400,00	1/500000
20	0,59999	400,00	$1,355 \times 10^{-7}$
30	0,48074	400,00	$1,005 \times 10^{-7}$
40	0,48074	400,00	$1,005 \times 10^{-7}$
50	0,48074	400,00	$1,005 \times 10^{-7}$
60	0,48074	400,00	$1,005 \times 10^{-7}$
70	0,48074	400,00	$1,005 \times 10^{-7}$
80	0,48074	400,00	$1,005 \times 10^{-7}$
90	0,48074	400,00	$1,005 \times 10^{-7}$
100	0,48074	400,00	$1,005 \times 10^{-7}$

Tabla1: Valores de parámetros térmicos y densidad de flujo de calor.

El motivo puede deberse a que los valores absolutos de los coeficientes de la matriz de sensibilidad en la mayoría de los tiempos para los tres parámetros difieren entre sí por varios ordenes, siendo mayores los correspondientes al parámetro α (orden 6), columna $j=3$ y menores los correspondientes a q'' (orden -1), columna $j=2$, como se muestra en la tabla siguiente para los valores de $k=1, \alpha=5 \times 10^{-6}$ y $q'' = 400$.

i \ j	j=1	j=2	j=3 (10^6)
i=50	-4,02058	0,10051	5,325
i=51	-5,52790	0,13820	5,528
i=52	-5,13712	0,12843	5,519
i=53	-4,76472	0,11912	5,491
i=54	-4,41062	0,11026	5,446
i=55	-4,07466	0,10187	5,382

Tabla2: Valores de los coeficientes de la matriz de sensibilidad.

En ese sentido tuvimos que descartar el cálculo conjunto de q'' , α y k . Por tal motivo se determinó q'' en forma experimental y el par k, α en forma iterativa.

El procedimiento iterativo empleado se denomina método de gradiente conjugado (Ozisik, M y Orlande H, 2000) y está dado por:

$$\mathbf{P}^{k+1} = \mathbf{P}^k - \beta^k \mathbf{d}^k \quad (7)$$

Donde $\mathbf{P} = (P_1, P_2)$, β_k se denomina tamaño de paso de búsqueda, \mathbf{d}_k es la dirección de descenso y el subíndice k es el número de iteraciones. Se parte de una conjetura inicial \mathbf{P}_0 para los parámetros incógnitas. La dirección de descenso está dada por:

$$\mathbf{d}^k = \nabla S(\mathbf{P}^k) - \gamma^k \mathbf{d}^{k-1} \quad (8)$$

La dirección de gradiente está dada por:

$$[\nabla S(\mathbf{P}^k)]_j = \frac{\partial S}{\partial P_j} \quad (9)$$

El coeficiente de conjugación se define como:

$$\gamma^k = \frac{\sum_{j=1}^N \{[\nabla S(\bar{\mathbf{P}}^k) - \nabla S(\bar{\mathbf{P}}^{k-1})]_j\}}{\sum_{j=1}^N [\nabla S(\bar{\mathbf{P}}^k)]_j^2} \quad k = 1, 2, \dots \quad (10)$$

con $\gamma^0 = 0$ para $k = 0$

El tamaño de paso de búsqueda está dado por:

$$\beta^k = \frac{\sum_{i=1}^I \left[\left(\frac{\partial T_i}{\partial P^k} \right)^T \mathbf{d}^k \right] [T_i(\mathbf{P}^k) - Y_i]}{\sum_{i=1}^I \left[\left(\frac{\partial T_i}{\partial P^k} \right)^T \mathbf{d}^k \right]^2} \quad (11)$$

El criterio de detenimiento empleado es $|P_j^{k+1} - P_j^k| < \varepsilon_j$. En este caso $\varepsilon_1 = 0.01$ y $\varepsilon_2 = 10^{-8}$.

3.2 Comprobación del algoritmo y de su implementación.

Para comprobar el algoritmo, se supuso que una sustancia sólida de conductividad, $k = 0,6 \text{ W/m K}$ y difusividad, $\alpha = 1 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ con temperatura inicial $T_0 = 19^\circ\text{C}$, es sometida a un flujo de calor constante $q'' = 500 \text{ W/m}^2$ en el borde. A partir de la solución del problema directo (ecuaciones (1)a(3)) se generaron 100 temperaturas medidas simuladas sumando un número aleatorio entre -1 y 1 a las temperaturas calculadas en las posiciones 0, 1, 2, 3 y 4 cm, con intervalos de 1 minuto. Se ejecutó el algoritmo con valores iniciales: $k = 1 \text{ W/m K}$ y $\alpha = 2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. Luego de 20 iteraciones las estimaciones para k y alfa resultaron 0,600923 y $1,00491 \cdot 10^{-7}$ las que están de acuerdo con los valores hipotéticos de la sustancia.

También se realizó con el mismo método un programa que estima el flujo de calor constante aplicado en el borde, en este caso la incógnita, cuando se tiene como datos la conductividad y la difusividad térmicas. El problema resulta particularmente simple pues es lineal en q'' , en el sentido que la matriz de sensibilidad es independiente del mismo. En tal caso el parámetro desconocido q'' puede ser resuelto en forma explícita como:

$$\mathbf{P} = (\mathbf{J}^T \mathbf{J})^{-1} \mathbf{J}^T \mathbf{Y} \quad (12)$$

Para el caso de la grasa con $q'' = 500$, con valores dados de $k = 0,5$ y $\alpha = 9,4 \cdot 10^{-8}$, se ejecutó este programa con valores iniciales para q'' de 400 y 600 y se obtuvo una estimación para el flujo de calor de 498,94 y 498,95 respectivamente.

4 ENSAYO EXPERIMENTAL

4.1 Medición de las temperaturas

El contenedor de la sustancia es un cilindro de vidrio de 0,001 m de espesor y diámetro interno $D = 0,048$ m. En la base del recipiente se adosó una placa de aluminio de 0,001 m de espesor para uniformizar la temperatura de la superficie por la que ingresa el calor. El calefactor es una resistencia eléctrica de 110Ω , a la que se aplica un voltaje de 15 V, lo que genera una potencia máxima de 2 W pero lo que efectivamente ingresa es más o menos 1 W. El dispositivo se aísla térmicamente con una cubierta de poliestireno expandido de 5 cm de espesor a fin de reducir las pérdidas de calor y lograr un flujo de calor unidimensional en la dirección vertical. Los sensores de temperatura son termocuplas de cobre-constantan de 0,0003 m de diámetro y recubiertas con cinta de teflón, las cuales previo a los ensayos se calibran en el rango, de 15 a $70 \text{ }^\circ\text{C}$.

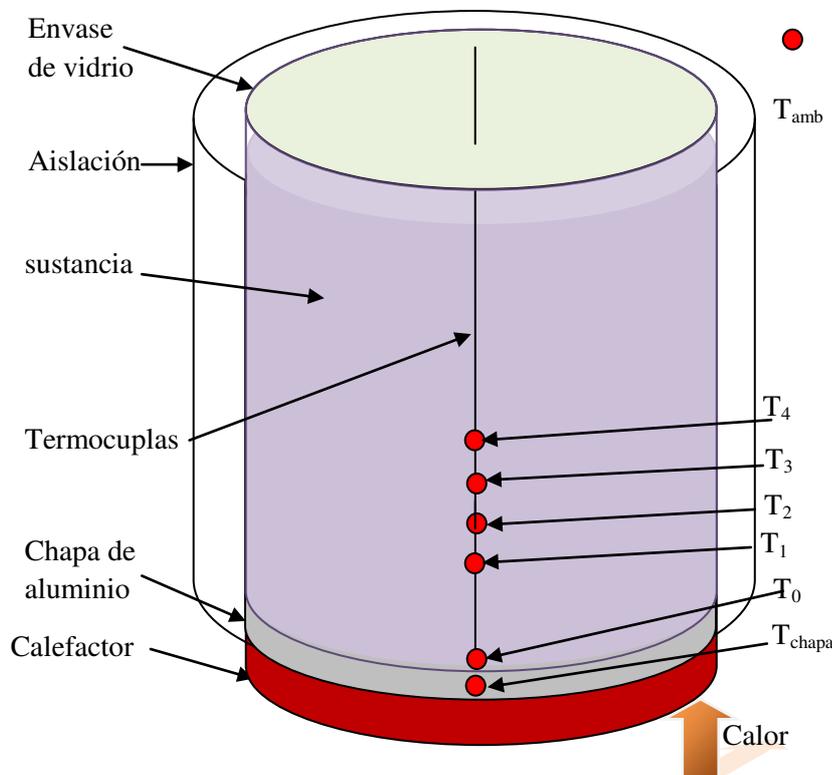


Figura 1: Contenedor con la muestra de grasa, disposición de los sensores.

Los sensores registran temperaturas cada 2 min. El sensor ubicado en el piso mide la temperatura T_0 y se adhiere al mismo antes hacerse el llenado con la sustancia. La sustancia se introduce en estado líquido y alcanza una altura L (0,18 m). El recipiente se cierra con una tapa de goma previamente perforada para introducir 3 sensores que registran las temperaturas T_1 , T_2 , T_3 y T_4 que se ubican en el eje del cilindro, a 1, 2, 3 y 4 cm del piso. Otro sensor se ubica en la placa calefactora y mide la temperatura T_C . Se registra también la temperatura ambiente T_a .

Las termocuplas se anexaron a módulos ADAM que conectados a una PC permiten registrar y guardar los datos para el posterior procesamiento. En la Figura 1 se muestra

un esquema de parte del dispositivo experimental utilizado y las posiciones de las termocuplas.

El tiempo del ensayo se limitó por la condición de que la temperatura en el borde de la sustancia sea menor que la temperatura de fusión para no se puedan iniciar los procesos convectivos que ocurren con la sustancia en estado líquido.

La sustancia orgánica ensayada es grasa vacuna, algunas de sus propiedades termofísicas fueron evaluadas anteriormente (Vilte M, Esteban S., 2017), siendo:

- Densidad $\rho = 914.2 \text{ Kg/m}^3$
- Punto de Fusión $T_f = 33.6 \text{ }^\circ\text{C}$

4.2 Medición del flujo de calor

Con el mismo dispositivo y en idénticas condiciones se calentó una masa de 300 g de agua durante un tiempo conocido para determinar la densidad de flujo de calor en el borde. El calor específico del agua $C_p = 4,18 \text{ J/g K}$. Se calculó la transferencia de calor a la masa de agua con la expresión $Q = m C_p (T_f - T_i)$ y luego de dividir por el tiempo y el área ($A = 0,0018 \text{ m}^2$) se obtiene la densidad de flujo de calor q'' (Tabla 3).

T_o	T_f	Tiempo de calentamiento	Q	q''
23,1	25,8	63 minutos	3385,8	495
25,5	28,2	60 minutos	3385,8	520

Tabla3: Valores determinados de flujo y densidad del flujo de calor.

En base a estos resultados se tomó $q'' = 500 \text{ W/m}^2$.

5 RESULTADOS

El procedimiento iterativo se implementó en un programa, en lenguaje WolframMathematica, que estima k y α a partir de una conjetura inicial para los mismos, con q'' y las temperaturas en puntos interiores determinados experimentalmente.

Con la conjetura inicial: $k^0 = 0,8$, $\alpha^0 = 5 \cdot 10^{-7}$ y $q'' = 500$ luego de 100 iteraciones se obtiene $k = 0,50$ y $\alpha = 9,4 \cdot 10^{-8}$. Se observa que a partir de la iteración 20 (Tabla 4) las dos primeras cifras significativas de k y α se mantienen constantes. A partir de la iteración 32 se mantienen constantes 6 cifras significativas de k y a partir de la iteración 35 sucede lo mismo para α .

iteracion	k	α
10	0,498012	$8,42155 \times 10^{-8}$
20	0,500898	$9,40192 \times 10^{-8}$
32	0,502079	$9,43286 \times 10^{-8}$
35	0,502079	$9,43287 \times 10^{-8}$
40	0,502079	$9,43287 \times 10^{-8}$

Tabla4: Valores estimados de conductividad y difusividad térmicas.

En la Tabla 5 se muestra que para otras conjeturas iniciales se obtienen los mismos valores finales de k y α .

Iteración	k^0	α^0	k	α
41	1	1×10^{-6}	0,502079	$9,43287 \times 10^{-8}$
47	0,2	1×10^{-9}	0,502079	$9,43287 \times 10^{-8}$

Tabla 5. Valores estimados de conductividad y difusividad térmicas para diferentes conjeturas iniciales.

Con los valores de k y α obtenidos en este trabajo y el valor de la densidad $\rho = 922 \text{ kg / m}^3$ a $25 \text{ }^\circ\text{C}$ (Vilte M, Esteban S., 2017), se calculó el calor específico promedio de la grasa de $5,8 \cdot 10^3 \text{ J/kg }^\circ\text{C}$.

La sustancia orgánica estudiada es una grasa bovina, la misma está clasificada como una sustancia alimenticia. (Choi y Okos, 1987) estudiaron el efecto de la variación de la composición en las propiedades térmicas obteniendo correlaciones para los siguientes componentes: humedad, proteínas, lípidos, carbohidratos, fibras y cenizas. Estas correlaciones están en función de la temperatura a la que está expuesto el alimento. Se determinó la conductividad térmica y la capacidad calorífica de la grasa vacuna empleando la composición dada en el trabajo (Ochoa O. et al, 2006). Los valores obtenidos son los que a continuación se detallan: $k = (0.20 \pm 0.01) \text{ W/m }^\circ\text{C}$ y $C_p = (2380 \pm 1) \text{ J/}^\circ\text{C kg}$ a 25°C . Estos valores son menores que la mitad de los estimados en este trabajo. Las diferencias pueden explicarse por la falta de un conocimiento preciso de la composición de la sustancia. La fuente de error más importante esposiblemente, que para aplicar el método se modeló la muestra como un sistema con propiedades termofísicas constantes y probablemente la variación de estas en el rango de temperaturas estudiado no sea despreciable. Por otra parte otras hipótesis como conducción unidimensional, densidad de flujo de calor uniforme en el borde y otras, son tal vez más aproximadas a la realidad y por lo tanto fuentes de error menos importantes, como también lo son los errores de medición.

6 CONCLUSIONES

El método empleado para estimar k y α es numérico y experimental. El algoritmo es efectivo, su implementación computacional sencilla y su ejecución en una PC, rápida. Pero tal vez no sea el más conveniente si se desea obtener k y α como función de la temperatura. Desde el punto de vista experimental hubo que mantener acotado el rango de variación de la temperatura para evitar la fusión y el inicio de la convección. Las medidas realizadas pueden emplearse para determinar propiedades termofísicas como función de la temperatura.

La determinación de propiedades termofísicas de la fase líquida requiere la solución del problema directo de transferencia convectiva en una cavidad lo que solo es posible en forma numérica en forma diferente a este trabajo donde se empleó una solución analítica. Para el objetivo de este trabajo es válido y conveniente buscar el modelo más sencillo que sea adaptable a una disposición experimental.

Se ha determinado en forma experimental y se ha comprobado con los resultados numéricos, la densidad de flujo de calor que ingresa a la muestra. Este dato es importante para avanzar en la determinación de los parámetros térmicos de la sustancia, tanto para los considerados en este trabajo, o los que a futuro se planteen como incógnitas.

Los valores de conductividad y difusividad térmico obtenidos están dentro del orden de los calculados con las expresiones analíticas y la composición de la grasa. En este aspecto debe conseguirse mayor precisión en la composición de la sustancia orgánica, para lograr un mejor acuerdo con los valores numéricos obtenidos.

A futuro en la misma línea de resolución de problema inversode conducción, se pretende avanzar en la determinación de la conductividad y difusividad como funciones

de la temperatura.

REFERENCIAS

- Bejan, A., *Heat Transfer*, John Wiley & Sons, Inc.1993
- Choi, Y.; Okos, M., (1986). Effect of temperature and composition on the thermal properties of foods In: LE MAGUER, M.,1986. Food Engineering and Process Applications. Elsevier Applied Science Publisher. London.613p.
- Ochoa, O., Amezquita, A. and Chejne, F. Propiedades Termofísicas de la carne Revisión Del Estado Del Arte. *Dynarev.fac.nac.minas [online]*. 2006, vol.73, n.148 pp.103-118. ISSN 0012-7353.
- Ozisik, M. N., and Orlande, H. R. B., *Inverse Heat Transfer*,CRC Press, Taylor & Francis Group, 2000.
- VilteM., Esteban S. y Toro M..*Caracterización de una sustancia orgánica: determinación de propiedades físicas y térmicas*. Acta de la XL Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 5, pp. 03.41-03.47, 2017. Impreso en la Argentina. ISBN 978-987-29873-0-5