

IDENTIFICACIÓN DE REGÍMENES Y NÚMEROS ADIMENSIONALES EN LA FUSIÓN DE UNA GRASA ÓRGÁNICA

María del S. Vilte¹, Sonia Esteban¹, Carlos Martínez¹, Dante Domínguez²

¹Facultad de Ciencias Exactas-Universidad Nacional de Salta. INENCO.

²Facultad de Ingeniería- Universidad Nacional de Salta. C.P. 4400 – Salta

Tel. 0387-42554389, e-mail: mvilte88@gmail.com

RESUMEN: El propósito de este trabajo es la identificación de la escala y los regímenes básicos del proceso de fusión de un material de cambio de fase (grasa vacuna) en un recinto cerrado, calentado lateralmente con un flujo de calor constante. El análisis de la evolución temporal de la distribución de temperaturas medidas experimentalmente, en el interior de la sustancia, permite reconocer tres regímenes diferentes de transferencia de calor durante el proceso de fusión. En función de los parámetros físicos y térmicos conocidos de la sustancia se calculan los números de Prantl (Pr), Rayleigh (Ra), Stefan (Ste) y Nusselt (Nu) involucrados en las ecuaciones que describen transferencia térmica y dinámica del proceso. El orden del número de Rayleigh obtenido para las experiencias realizadas es de 10^7 . El valor calculado del número de Prantl se corresponde con el de sustancias orgánicas. Los valores obtenidos del número de Nusselt permiten explicar la interacción entre la transferencia de energía conductiva y convectiva que se establecen y predominan en las diferentes etapas de la fusión de la grasa orgánica.

Palabras clave: cambio de fase, números adimensionales, fusión, grasa orgánica, convección natural.

INTRODUCCIÓN

Los materiales de cambio de fase (PCM, en inglés: Phase Change Materials) absorben o ceden energía térmica cuando alcanzan la temperatura de cambio de fase, es decir, cuando pasan por ejemplo de estado sólido a líquido o viceversa. Durante el cambio de fase la temperatura se mantiene constante y el material sigue acumulando o liberando energía. Estas características se pueden aprovechar en múltiples aplicaciones: pueden actuar como termorreguladores disminuyendo la dependencia con los sistemas de climatización, reduciendo así el consumo energético. También pueden almacenar grandes cantidades de energía térmica en forma de calor latente en volúmenes relativamente pequeños, la que se puede disponer en otro momento (Mohamed et al, 2017).

La posibilidad de acumulación de energía con materiales de cambio de fase es una perspectiva interesante para el acondicionamiento térmico de locales para diferentes usos. Las sustancias orgánicas pueden ser envasadas en recipientes de vidrio o chapa y adosarse a las paredes de los locales ya construidos o bien mezclarse, en proporciones adecuadas, con otros materiales de construcción, constituyendo las paredes del propio local (Kuznik et al. 2008; Liu y Awbi, 2009, Castell y Farid, 2014; Lee et al. 2015, Hamdan y Elwerr, 1996). El problema de la fusión de un material de cambio de fase en una cavidad rectangular calentada lateralmente ha sido ampliamente estudiado tanto experimental como numéricamente (Dhaidan Nabeel S. and Khodadadi J.M, 2015; Hamad et al, 2017; David et al, 2011). Los recintos rectangulares son una de las configuraciones geométricas más sencillas y comunes utilizadas en los sistemas de almacenamiento de energía térmica por calor latente, como así también en el acondicionamiento de edificios. Por este motivo el estudio del proceso de fusión en estos materiales es fundamental, en vistas a cuantificar la energía que pueden almacenar y la disponibilidad de esta.

El propósito de este trabajo experimental es la obtención de las escalas de Pr, Ra, Ste y Nu; y la identificación de los regímenes del proceso de fusión de un PCM, en un recinto cerrado, calentado lateralmente con un flujo de calor constante; a partir de la evolución temporal de la temperatura.

MATERIALES Y MÉTODOS

Dispositivo Experimental

El estudio del proceso de fusión se realiza empleando modelos a escala de laboratorio que contienen el material de cambio de fase ensayado. Se construyen recintos rectangulares de altura (H), ancho (L) y profundidad (W), en vidrio de 0,003 m de espesor que se encuentran aislados térmicamente mediante una placa de 0,02 m de poliestireno expandido, excepto en la pared vertical en la que se suministra un flujo de calor constante mediante un calefactor eléctrico (superficie: $H \times W$, resistencia: 173Ω) conectado a una fuente (DC POWER SUPPLY modelo HY3003D-3). Entre la pared de vidrio del recinto y el calefactor se ubica una placa de aluminio de 0,001m de espesor a fin de homogeneizar la temperatura. En la Fig. 1(a) se muestra un esquema de la disposición de los elementos del sistema de calentamiento, el recinto que contiene el material de cambio de fase y la aislación térmica.

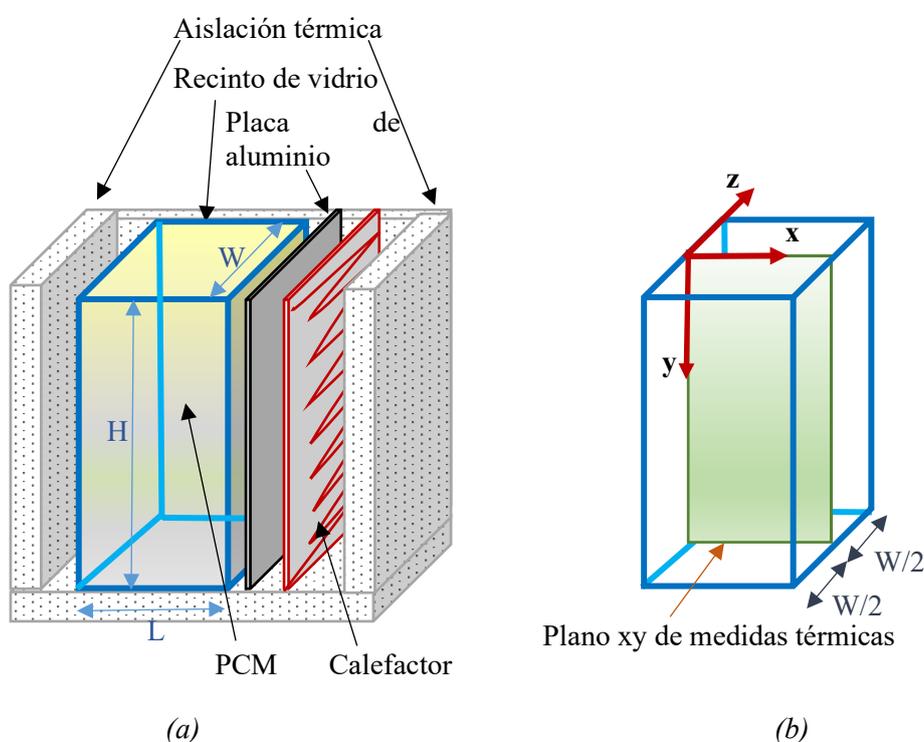


Figura 1: (a) Esquema del dispositivo experimental. (b): Plano xy de medidas térmicas

| Dimensión del modelo (m ³) | Masa (kg) | Relación de aspecto (L/H) | Potencia Aplicada | Sensores en el interior del PCM, plano xy: T(x(cm),y(cm)) |
|--|-----------|---------------------------|-------------------|---|
| 0,06x0,12x0,30 (LxWxH) | 1,94 | 0,20 | 17,5 W | T(1, 5), T(1,10), T(1, 15), T(1,20) T(3, 5), T(3, 10), T(3, 15) T(5, 5), T(5, 10), T(5, 15) |
| Sensores en el centro de la superficie interna y externa de la pared calentada | | | | T_{inca} , T_{exca} |
| Sensores en el centro de la superficie interna y externa de la pared fría | | | | T_{infria} , T_{exfria} |
| Sensor en el centro de la superficie interna de la pared inferior o piso | | | | T_{inpis} |

Tabla 1. Información detallada sobre el recinto ensayado.

Para examinar térmicamente el proceso de fusión, se plantea un estudio de la distribución de temperaturas. En la Fig. 1(b) se muestra el plano xy , ubicado en el centro del recinto y perpendicular a la pared calentada. En este plano se ubican los sensores de temperatura. Se emplean 16 termocuplas tipo T anexadas a un equipo adquiredor de datos que consta 2 módulos ADAM 4018 (Sample Rate: 10 samples/sec; Accuracy: 0,1%) y un módulo ADAM 4520 que transforma la señal RS-485 que entrega el ADAM 4018 en RS-232, y que conectados a una PC permiten registrar y guardar los datos para el posterior procesamiento. En la tabla 1 se especifica información sobre la notación usada en el análisis de las medidas térmicas, las posiciones de las termocuplas, las dimensiones del recinto y la potencia de calentamiento aplicada. Las termocuplas fueron calibradas con un Block calibrador de aire de TECHNE modelo B-700A. En la figura 2(b) puede observarse la posición de las termocuplas en el plano xy .

Inicialmente, el recinto se encuentra con el material sólido a temperatura uniforme de laboratorio, T_o menor que la temperatura de fusión de la sustancia (T_F), ($T_o < T_F$). En el tiempo $t = 0$ s, se aplica sobre una pared vertical un flujo de calor constante (q'') mientras que la pared opuesta se mantiene a la temperatura inicial o de referencia (T_o). Las paredes restantes del recinto son adiabáticas. Como resultado del calentamiento, el PCM adyacente a la pared calentada alcanza la temperatura de fusión, dando inicio al proceso de fusión. La interfase sólido-líquido comienza a moverse alejándose de la pared caliente como se muestra en un registro fotográfico de visualización del proceso de fusión, Fig. 2(a).

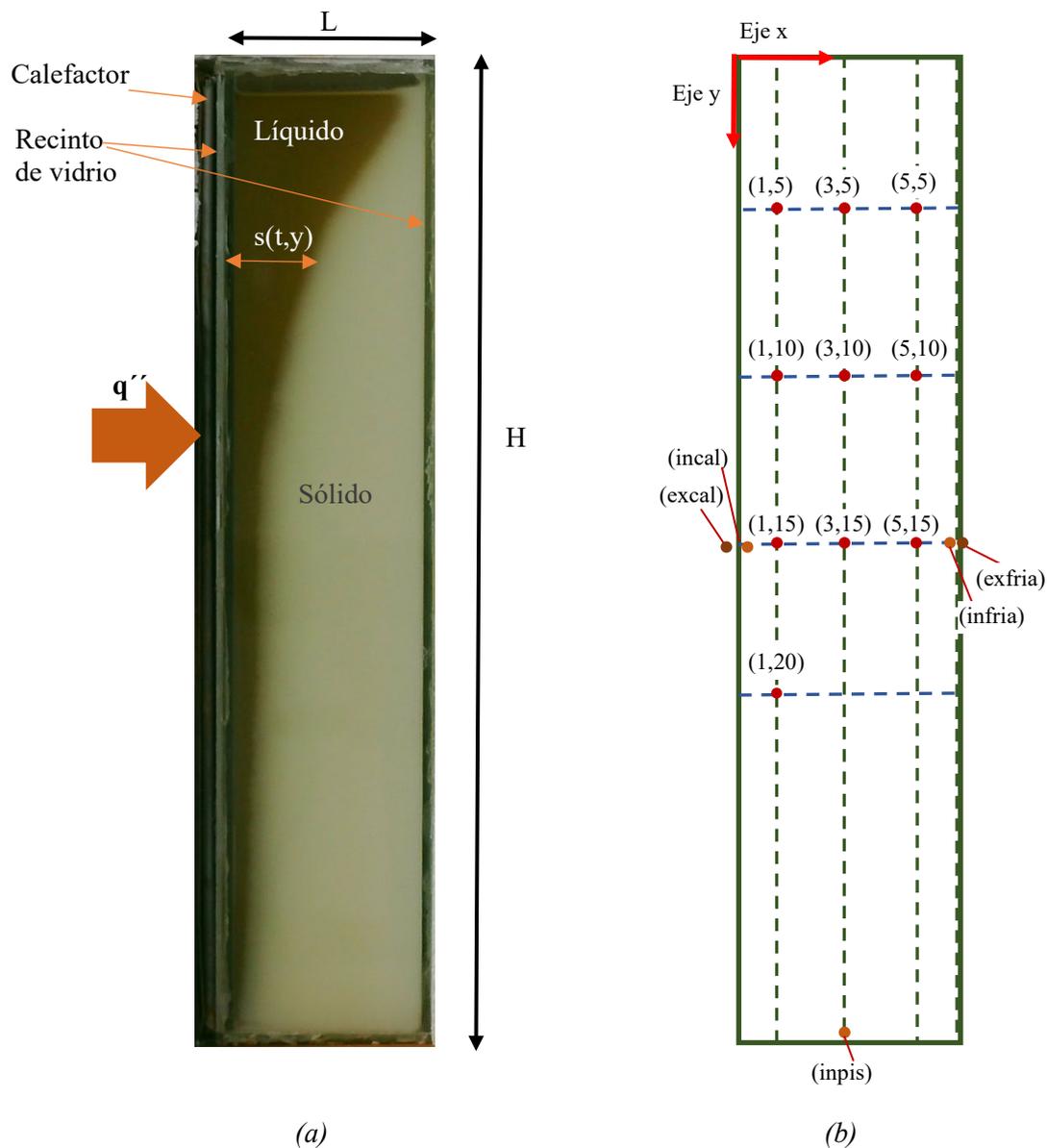


Figura 2: (a) Registro fotográfico del proceso de fusión, (b) Posición de los sensores en el plano xy .

Dada la geometría del modelo y la evolución del flujo en el tiempo, este proceso puede dividirse en tres etapas:

- Un régimen puramente conductivo donde la frontera avanza paralela a la pared calentada formando una capa de espesor constante.
- Una segunda etapa de transición del régimen conductivo al de convección natural, en la zona cercana al techo ($y \sim 0$), la frontera se desplaza más rápidamente hacia la pared opuesta dejando de ser constante el espesor de la capa líquida.
- Por último, la etapa de régimen de convección natural que comienza cuando el frente de fusión cercano al techo alcanza la pared opuesta más fría.

Estas etapas se analizan en el abordaje experimental, en base a las medidas térmicas y al análisis de los valores de los números adimensionales obtenidos. Se considera en virtud la aislación realizada que, las pérdidas de calor en las paredes del recinto son despreciables, el material es homogéneo e isotrópico y por último el flujo convectivo que se establece es bidimensional, no depende de la dirección z (Vilte, Esteban, 2014). Se considera que, durante la fusión, la transferencia de calor se realiza por conducción y por convección, se desestiman las transferencias térmicas por radiación en el sistema considerado.

Propiedades del PCM

El Código Alimentario Argentino (Ley 18.284, Decreto 2126/71) con respecto a la grasa estudiada en el Artículo 543 -(Res 2012, 19.10.84) dice: "Se entiende por Primer jugo bovino u ovino, según corresponda, el producto separado por fusión a temperatura no mayor de 80°C de los tejidos y partes adiposas limpias e inalteradas de animales bovinos (*Bos taurus*) u ovinos (*Ovis aries*). Deberá responder a las exigencias del Art 540 y a las siguientes: Índice de saponificación: 190 a 200; Índice de yodo (Wijs): 31 a 47; Insaponificable, Máximo: 1,00%; Acidez libre, Máx: 1,60 mg KOH/g (0,80% como ácido oleico); Temperatura de solidificación de ácidos grasos (título), Máxima: 46°C ; Índice de peróxido, Máximo: 10,0 miliequivalente de Oxígeno/kg; Impurezas insolubles en éter de petróleo, Máx: 0,05%. Presentará color blanco-crema a amarillo pálido y sabor característico exento de olores y sabores extraños". En la figura 3(a) se muestra al aspecto de la sustancia, donde se puede apreciar el color y la textura y en la figura 3(b) una presentación comercial de la usada en todas las experiencias.

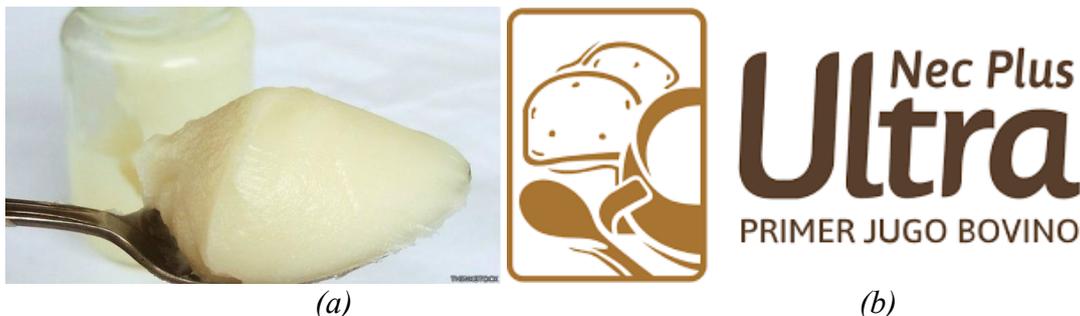


Figura 3: Sustancia de cambio de fase estudiada (primer jugo bovino). Fuente: Imagen (a): <https://www.bbc.com/mundo/noticias>. Imagen (b): <http://necplusultra.pasqualesrl.com.ar/>.

La grasa vacuna como material de cambio de fase se ha ensayado en trabajos anteriores, tanto en lo que hace al estudio del proceso de fusión de la sustancia (Vilte y Bouciguez, 2011), como así también a la caracterización de dicha sustancia (Vilte y Esteban, 2017; Lozano y Vilte, 2018). En este último aspecto en la Tabla 2 se indican algunas propiedades de dicha sustancia determinadas en forma experimental.

| Temperatura de fusión ($^{\circ}\text{C}$) | Conductividad térmica (W/m K) | Densidad (kg/m^3) | Viscosidad dinámica (kg/m s) | Difusividad térmica (m^2/s) |
|---|--|------------------------------|---|---|
| $33^{\circ}\text{C} < T_F < 38^{\circ}\text{C}$ | 0,5 | 891,2 | $5,3 \times 10^{-3}$ | $9,4 \times 10^{-8}$ |

Tabla 2. Propiedades del PCM determinadas experimentalmente.

| | | |
|---|-----------------------|----------------------|
| Coefficiente de expansión volumétrica (1/K) | $1,54 \times 10^{-3}$ | (Jarvis H. F., 1971) |
| Calor latente de fusión (J/kg) | 101050 | (Razali et al, 2019) |
| Capacidad Calorífica (J/kg K) | 2900 | (Razali et al, 2019) |

Tabla 3. Propiedades del PCM extraídas de la bibliografía.

Por otro lado, hay algunas propiedades que se han obtenido de la bibliografía y se detallan en la Tabla 3, indicando su origen.

RESULTADOS EXPERIMENTALES OBTENIDOS

Para estudiar térmicamente y obtener imágenes del proceso de fusión de la sustancia de cambio de fase se llevan a cabo experiencias de calentamiento y enfriamiento del PCM, en un laboratorio donde la temperatura ambiente puede variar entre 16 y 20 °C. En la Fig. 4 se muestra la evolución temporal de la temperatura en distintas paredes del recinto (Tabla 2), se puede observar que la etapa de calentamiento se extiende entre seis y siete horas. La temperatura de la superficie interior del piso (T_{inpis}) se acerca a los 37°C, por lo que, en este ensayo casi toda la sustancia después de seis horas de calentamiento está prácticamente líquida.

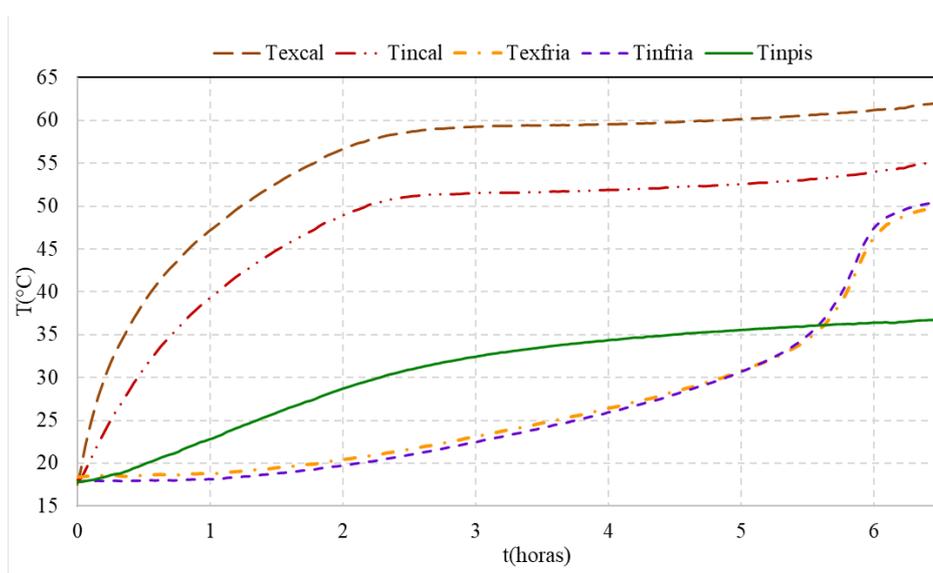


Figura 4: Evolución temporal de temperaturas en las paredes del recinto ensayado.

En las Fig. 5, 6 y 7 se presenta la evolución temporal de temperaturas verticales en el interior del recinto, para diferentes posiciones horizontales: $T(1, y)$, $T(3, y)$ y $T(5, y)$. En la etapa de calentamiento, en cada una de las gráficas, se pueden apreciar tres etapas: la primera (régimen conductivo) donde los perfiles tienen un comportamiento prácticamente lineal con el tiempo. Una vez que la sustancia se funde ($32^\circ\text{C} \leq T_F \leq 38^\circ\text{C}$) todos los perfiles experimentan un cambio de pendiente que provocan una separación de estos (segunda etapa de transición a la convección). En una tercera etapa (régimen convectivo) los perfiles continúan creciendo (más lentamente) y guardan entre sí diferencias de temperatura prácticamente constantes hasta finalizar la etapa de calentamiento. Esta etapa convectiva, tiene mayor duración cerca de la pared caliente y va disminuyendo a medida que se acerca a la pared fría. También se advierte que, al final de la etapa de calentamiento ($t \geq 6$ horas) en la región inferior ($y \geq 15$ cm) se alcanzan temperaturas superiores a 50°C, lo que da cuenta que el material de cambio de fase se encuentra en estado líquido. En las figuras 5 y 7, además de los perfiles en el interior de la sustancia se muestran los correspondiente a la pared caliente (T_{excal} , T_{inca}) y fría (T_{exfria} , T_{infria}), respectivamente. De esta

manera, se destaca la concavidad de crecimiento del perfil $T(1, y)$, en la figura 5 y de $T(5, y)$ en la figura 7.

En la Fig. 5 se puede observar que al comienzo de la experiencia (etapa conductiva), los perfiles de temperaturas cercanos a la pared caliente: $T(1, 5)$, $T(1, 10)$ y $T(1, 15)$, presentan una disminución de pendiente a medida se alejan de la pared superior. Esto se debe a que en la región superior se desarrolla más rápidamente el frente de fusión debido a la transferencia convectiva.

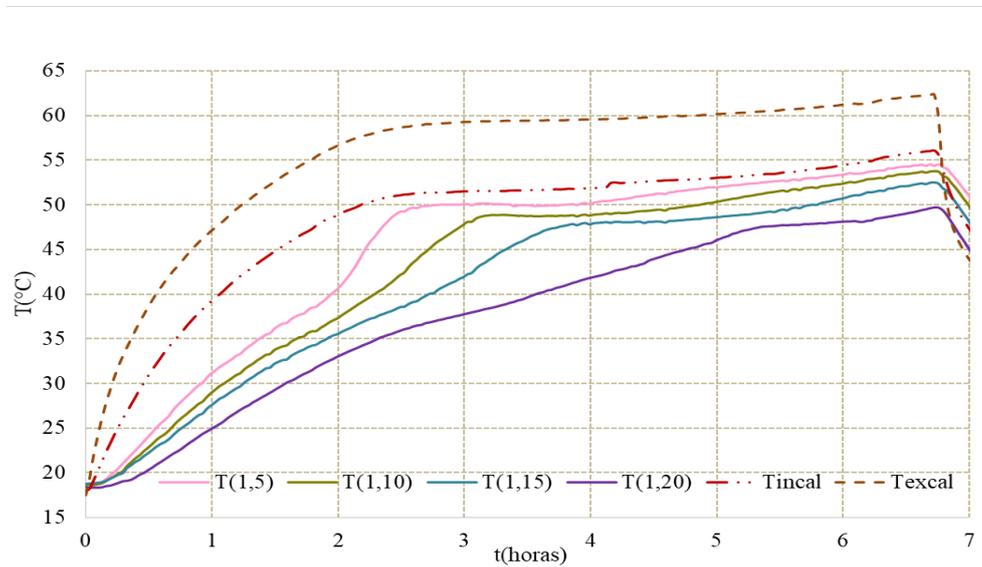


Figura 5: Evolución temporal de temperaturas, cerca de la pared calentada, $x=1$ cm.

La Fig. 6 muestra los perfiles de temperaturas de la región central: $T(3, y)$, se observa que al inicio del calentamiento los perfiles crecen casi linealmente, muy próximos entre sí, independientes de la variable y . En las dos primeras etapas de calentamiento (conductiva y de transición) estos perfiles son convexos, similares al observado en la pared fría: T_{infria} (Fig. 4).

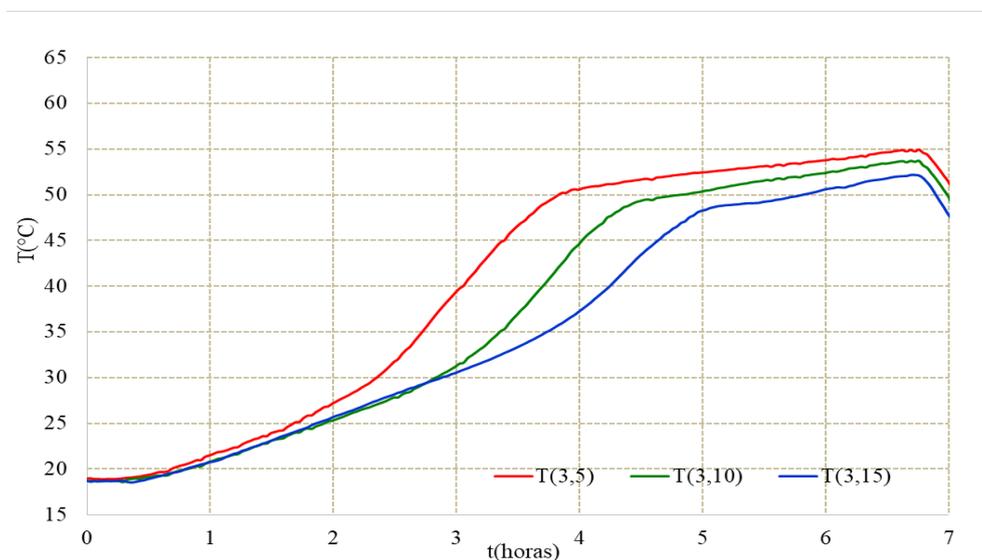


Figura 6: Evolución temporal de temperaturas en un plano vertical en el centro del recinto $x=3$ cm.

En la Fig. 7 se puede visualizar que, en la segunda etapa (de transición), se establecen grandes diferencias de temperatura. La etapa convectiva comienza cuando los tres perfiles superan los 50°C , esto ocurre a diferentes tiempos, entre cuatro y seis horas de iniciado el calentamiento.

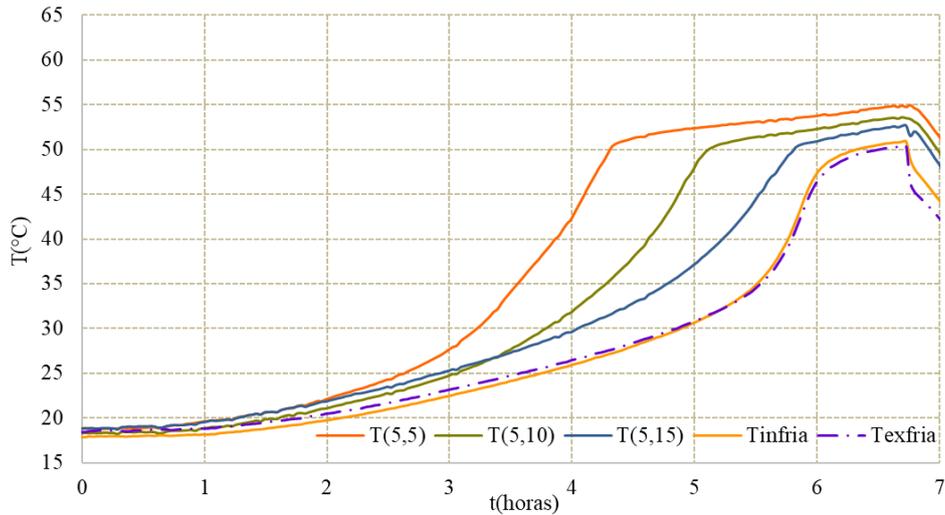


Figura 7: Evolución temporal de temperaturas, cerca de la pared fría, $x=5$ cm.

En la Fig. 8, sobre la evolución temporal de los perfiles, $T(3,10)$ y $T(3,15)$, se especifican las etapas de calentamiento y enfriamiento del PCM, como así también los tres tipos de regímenes observados: conductivo, de transición y convectivo. Además, se indica regiones donde el PCM líquido, se calienta por calor sensible. En la etapa de enfriamiento, se muestra que la sustancia presenta subenfriamiento. La experiencia de calentamiento tuvo una duración de 6,3 horas y la temperatura ambiente fue algo superior a 20°C , pero la potencia de calentamiento fue la misma que ya se indicó en la Tabla 1.

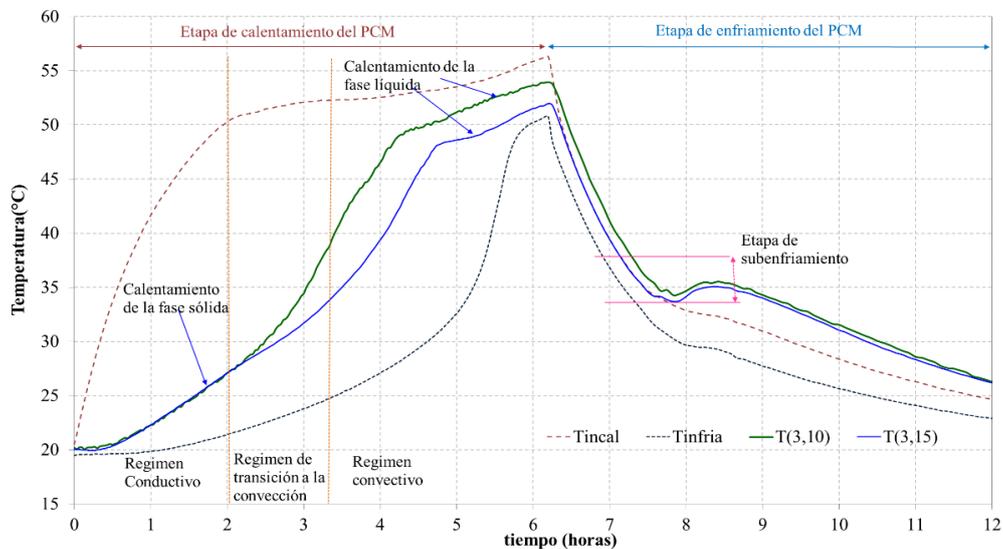


Figura 8: Evolución temporal de temperaturas en un ciclo completo de calentamiento y enfriamiento.

NÚMEROS ADIMENSIONALES QUE CARACTERIZAN EL PROCESO DE FUSIÓN DE LA SUSTANCIA ORGÁNICA

El problema de fusión en un recinto cerrado se caracteriza por los números de Prandtl (Pr), Rayleigh (Ra), Stefan (Ste) y la relación de aspecto del recinto, L/H (Bertrand et al, 1999). En el trabajo de Benard et al (1986) se afirma que la validez de las hipótesis asumidas en una simulación numérica depende del rango u orden de magnitud de los números adimensionales. Por otro lado, cuando se realiza un abordaje experimental, ya sea para comparar con otros estudios realizados con la misma o diferente sustancia,

con similares o diferentes condiciones iniciales y de contorno; el conocimiento del rango de los valores de los números adimensionales permite ubicar o posicionar el estudio realizado.

Número de Prantl (*Pr*)

El número de Prantl (*Pr*) permite en algún caso simplificar las ecuaciones de Navier Stokes, por ejemplo, según Zhang y Bejan (1988) en la ecuación de momentum de la capa límite térmica (líquida) se pueden desprestigiar los términos de inercia si *Pr* es mucho mayor que 1. Este número se define como el cociente entre la velocidad de difusión de la cantidad de momento (viscosidad cinemática ν) y la difusividad térmica (α):

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (1)$$

La viscosidad cinemática ν , la viscosidad dinámica μ y la densidad ρ de la sustancia, están relacionadas por:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (2)$$

En el caso de la grasa vacuna, el valor calculado de ν con los valores de la Tabla 2 de μ y ρ determinados experimentalmente (Vilte et al, 2017) es de $5,94 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$; además el valor de α indicado en la misma tabla y estimado numéricamente (Lozano y Vilte, 2018) es de $9,4 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$. Por lo tanto, el valor calculado del número de Prantl es de:

$$Pr \sim 62 \gg 1 \quad (3)$$

Según Bertrand et al. (1999) números bajos de Prantl ($Pr \sim 10^{-2}$) corresponden a la fusión de metales y números altos de Prantl ($Pr \sim 10^2$) corresponde a grasas parafinadas, por lo que el valor obtenido para la grasa orgánica está de acuerdo con los correspondientes a PCM orgánicos.

Número de Stefan (*Ste*)

Este número caracteriza la energía que la sustancia puede liberar o absorber en el proceso de cambio de fase. Se define como el cociente:

$$Ste = \frac{C\Delta T_L}{L_F} \quad (4)$$

Donde C y L_F son la capacidad calorífica y el calor latente de fusión de la sustancia respectivamente. ΔT_L es la diferencia de temperatura en el líquido, $T_L - T_F$. En el caso de la sustancia orgánica estudiada, la fusión del material se lleva a cabo con la aplicación de un flujo de calor constante por lo que la temperatura de la fase líquida T_L se incrementa con el tiempo, por lo tanto ΔT_L es una función del tiempo. Los valores de C y L_F empleados son los consignados en la Tabla 3.

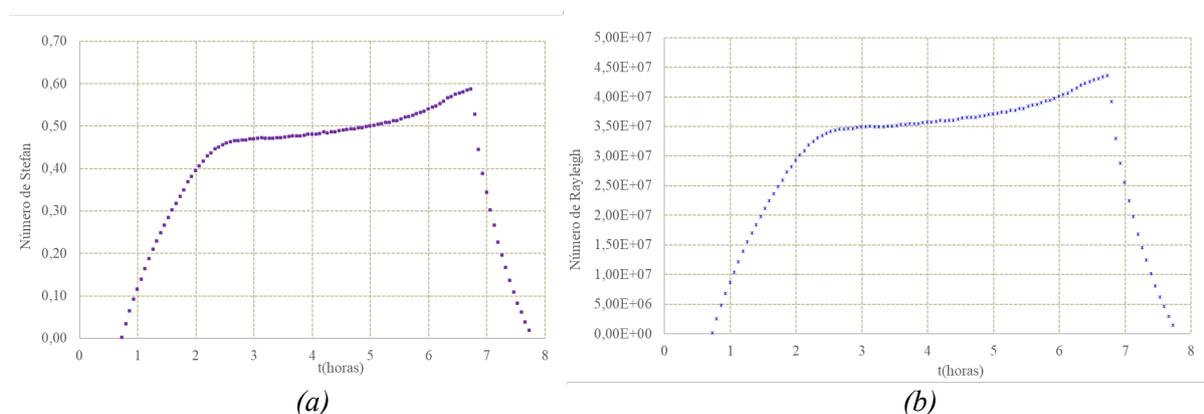


Figura 9: Evolución temporal, (a) del Número de Stefan, (b) del Número de Rayleigh.

En las Fig. 9(a) se muestra el número de Stefan en los diferentes regímenes que se establecen durante el proceso de fusión. Cabe aclarar que en la diferencia ΔT_L , se considera T_L , temperatura de la fase líquida, igual al valor de T_{inca} , la temperatura de la pared calentada en contacto con la sustancia de cambio de fase. De esta manera valores positivos del número de Stefan se obtienen a partir de $t=0,7$ horas cuando T_{inca} supera a T_F . El valor del número de Stefan calculado en las etapas de transición a la convección y convección pura según la Fig. 9(a) varía entre:

$$0,4 \leq Ste \leq 0,6 \quad (5)$$

De acuerdo con Zhang y Bejan (1989) se puede determinar un número de Ste^* independiente del tiempo, basado en q'' que es el flujo de calor constante que ingresa al recinto.

$$Ste^* = \frac{Cq''H^*}{kL_F} \quad (6)$$

Donde k es la conductividad térmica de la sustancia orgánica, el valor empleado es el indicado en la Tabla 2, que se obtuvo mediante un método numérico (Lozano y Vilte, 2018). Siguiendo un trabajo de Fadl y Heames (2019) para el cálculo de números adimensionales para el proceso de fusión en cavidades cerradas, H^* es una longitud característica definida por:

$$H^* = \frac{H \cdot L}{2(H + L)} \quad (7)$$

El valor de q'' , se determina en base a la potencia disipada en el área de la pared calentada:

$$q'' = \frac{V \cdot I}{A} \quad (8)$$

Donde $A = H \times W$. De esta forma aplicando la Ec. (6) se obtiene un valor de $Ste^* = 1,2$. Este valor resulta mayor que el obtenido mediante la Ec. (4), por lo que puede considerarse una cota superior para el número de Stefan.

Número de Rayleigh (Ra)

Del trabajo de Jany y Bejan (1988) se sabe que, para números de $Pr > 1$, las diferentes escalas de tiempo y tasas de transferencia de calor se pueden expresar en términos de leyes de potencia del número de Rayleigh. Para evaluar estas relaciones, un primer paso es el conocimiento del valor u orden de magnitud del Rayleigh definido por:

$$Ra = \frac{g\beta(T_L - T_F)H^{*3}}{\alpha\nu} \quad (9)$$

Donde g es la aceleración de la gravedad y β es el coeficiente de expansión volumétrica de la sustancia. Como ya se dijo antes, la expresión ΔT_L es una función de tiempo y valores positivos del número de Rayleigh se obtienen a partir de $t = 0,7$ horas cuando T_{inca} supera a T_F . En la Fig. 9(b) se muestra el número de Rayleigh en los diferentes regímenes que se establecen durante el proceso de fusión. El valor del número de Rayleigh calculado en las etapas de transición a la convección y predominantemente convectiva varía entre:

$$3 \times 10^7 \leq Ra \leq 4,5 \times 10^7 \quad (11)$$

Nuevamente siguiendo a Zhang y Bejan (1989), se puede estimar un Ra^* independiente del tiempo, basado en el flujo de calor q'' , cuya expresión es:

$$Ra^* = \frac{g\beta H^4 q''}{\alpha \nu k} \quad (12)$$

De esta manera se obtiene un $Ra^* = 2,17 \times 10^7$. Si bien este valor es del orden del Rayleigh calculado en las etapas de transición a la convección y predominantemente convectivo (Ec. 1), se ubica al final de la etapa conductiva (Fig. 8) alrededor de 1,5 horas de iniciado el calentamiento (Fig. 9(a)).

Número de Nusselt (Nu)

El número de Nusselt en la pared caliente se determina con la expresión:

$$Nu = \frac{q'' H}{k(T_{inca} - T_F)} \quad (13)$$

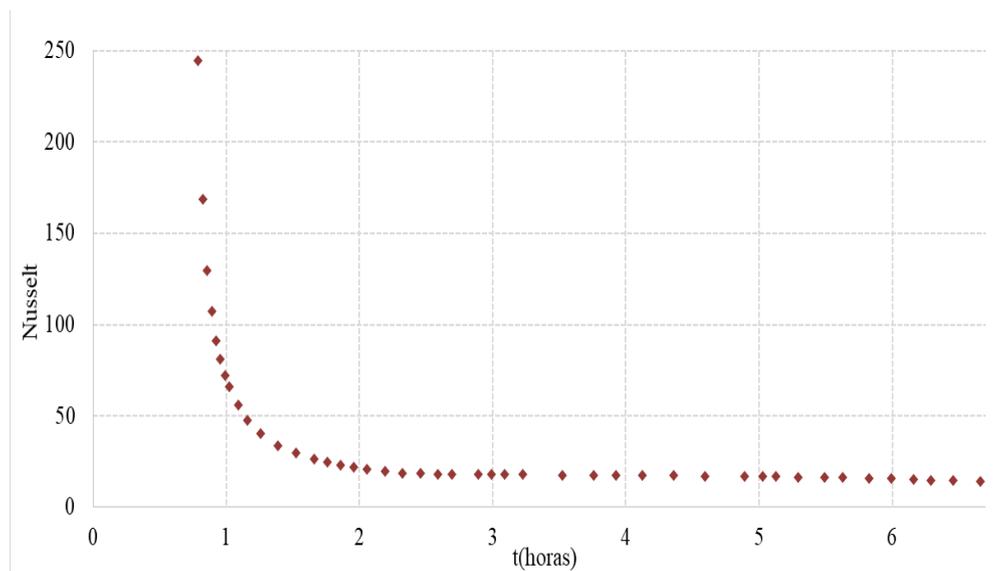


Figura 10: Evolución temporal del número de Nusselt en pared calentada del recinto.

En la Fig. 10 se muestra la variación temporal del número de Nusselt. Como ya se ha indicado anteriormente la temperatura inicial de la muestra T_0 es menor que T_F al inicio del calentamiento, por lo que Nu solo tiene sentido cuando $T_{inca} \geq T_F$, esto ocurre en los ensayos a partir de $t \sim 0,7$ horas. En la primera etapa del proceso de fusión, la conducción pura es el mecanismo dominante de transferencia de calor. La interfase se mueve paralela a la pared caliente, y la evolución temporal del frente de fusión viene dada por la solución clásica del problema de Stefan: $s(t,y) \sim \sqrt{t}$ (Alexiades y Solomon, 1993), por lo que el número de Nusselt disminuye como $1/\sqrt{t}$ (Bertrand et al, 1999). Luego, a medida que el espesor de la capa líquida crece con el tiempo, la influencia de la convección en la transferencia de calor se impone en la parte superior del recinto y progresivamente a lo largo de toda la interfase. En este régimen de transición, se establece una competencia entre la transferencia por conducción pura y la transferencia por convección natural lo que limita la disminución del número de Nusselt, que pasa por un mínimo y luego aumenta cuando el régimen de transferencia de calor está dominado por la convección (Zhang y Bejan, 1989). En el caso estudiado en este trabajo no se observa el mínimo mencionado, por lo demás coincide con lo expuesto en los trabajos citados. Finalmente, las capas límite en el líquido se separan y la transferencia de calor promedio alcanza un valor constante.

CONCLUSIONES

El análisis de la evolución temporal de la distribución de temperaturas permite identificar las distintas regímenes y etapas del proceso de fusión de una grasa orgánica. En la etapa de enfriamiento, se observa

el fenómeno de subenfriamiento. Este fenómeno permite identificar para cada ensayo la temperatura de solidificación de la sustancia, que como no es pura no coincide exactamente con la fusión, pero se encuentra en un intervalo alrededor de ella.

El valor del número de Prantl obtenido (Ec. 4) permite identificar la sustancia como un compuesto orgánico ($Pr = 62 > 1$). Para las experiencias realizadas con esta grasa vacuna los números de Stefan varían entre $0,1 \leq Ste \leq 1,5$. El orden del número de Rayleigh obtenido para las experiencias realizadas es de 10^7 . El número de Nusselt permite analizar la competencia entre la transferencia conductiva y la convectiva presentes en el proceso de fusión.

Con respecto al PCM estudiado, la grasa vacuna, hay estudios actuales sobre su aplicación como parte de un sistema de refrigeración pasiva de paneles fotovoltaicos (Karami et al, 2021), en este sentido el agregado de otras sustancias al jugo bovino, permiten mejorar las propiedades térmicas involucradas en la transferencia de energía (Razali et al, 2019). Estos estudios ponen de manifiesto la relevancia del estudio del proceso de fusión de esta sustancia.

En vistas a la simulación del proceso, se pretende realizar un análisis más profundo de los parámetros pertinentes y de las leyes de escala del problema considerado, para mostrar si fuera posible que las diferentes escalas de tiempo y rapidez de transferencia de calor se pueden expresar en términos de leyes de potencia de los números de Rayleigh, Stefan o Prantl.

REFERENCIAS

- Alexiades, V. y Solomon, A. *Mathematical Modelling of Melting or Freezing Processes*. Hemisphere Publishing Corporation, A Member of the Taylor & Francis Group, 1993.
- Benard C., Gobin D. y Zanolli A. (1985). Moving boundary problem: heat conduction in the solid phase of a phase-change material during melting driven by natural convection in the liquid. *Int. J. Heat Mass Transfer*. Vol. 29, N° 11, pp. 1669-168.
- Bertrand O., Binet B., Combeau H., Couturier S., Delannoy Y., Gobin D., Lacroix M., Le Quéré P., Médale M., Mencinger J., Sadat H. y Vieira G. (1999). Melting driven by natural convection a comparison exercise: first results, *Int. J. Therm. Sci.* 38 (1) 5–26.
- Castell A. y Farid M. (2014). Experimental validation of a methodology to assess PCM effectiveness in cooling building envelopes passively, *Energy Build.* 81, 59-71.
- David D., Kuznik F. y Roux J. (2011). Numerical study of the influence of the convective heat transfer on the dynamical behavior of a phase change material wall. *Applied Thermal Engineering* 31, 3117-3124. Available online www.sciencedirect.com.
- Dhaidan N. y Khodadadi J. (2015). Melting and convection of phase change materials in different shape containers: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 43, 449–477.
- Fadl M. y Eames P. (2019). An experimental investigation of the melting of RT44HC inside a horizontal rectangular test cell subject to uniform wall heat flux. *International Journal of Heat and Mass Transfer* Volume 140, pp. 731-742.
- Farid M., Khudhair A., Razack S. y Al-Hallaj S. (2004). Review on Phase Change Energy Storage: Materials and Applications. *Energy Conversion and Management* 45, 1597 – 1615.
- Hamad F., Egelle E., Cummings K. y Russell P. (2017). Investigation of the melting process of polyethylene glycol 1500 (PEG 1500) in a rectangular enclosure. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 114, pp.1234–1247.
- Hamdan M. y Elwerr F. (1996). Thermal energy storage using a phase change material. *Solar Energy* Vol. 56, No. 2, pp. 183-189.
- Jany P. y Bejan A. (1988). Scaling theory of melting with natural convection in an enclosure. *Int. J. Heat Mass Transfer*. Vol. 31, No. 6, pp. 1221-1235. Pergamon Press.
- Jarvis H. (1971). *Environmental Science*. *International Journal of Food Science and Technology*. Vol. 6, Edition 4, pp. 383-391.
- Karami B., Azimi N. y Ahmadi S. (2021). Increasing the electrical efficiency and thermal management of a photovoltaic module using expanded graphite (EG)/paraffin-beef tallow-coconut oil composite as phase change material. *Renewable Energy* 178, 25-49.

- Lee K., Medina M., Raith E. y Sun X. (2015). Assessing the integration of a thin phase change material (PCM) layer in a residential building wall for heat transfer reduction and management, *Appl. Energy* 137, 699-706.
- Liu H. y Awbi H. (2009). Performance of phase change material boards under natural convection. *Build. Environ.* 44 (91788-1793).
- Lozano F. y Vilte M. (2018). Estimación de parámetros Térmicos de una grasa por un método de solución de problema inverso. *Mecánica Computacional Vol XXXVI*, págs. 2159-2167.
- Mohamed S., Al-Sulaimana F., Ibrahima N., Zahira Md. H., Al-Ahmeda A., Saidura R., Yılbaş B. y Sahina A. (2017). A review on current status and challenges of inorganic phase change materials for thermal energy storage systems. *Renewable Energy* 107, 1072–1089.
- Razali T., Muhammad A. y Hamdani U. (2019). Thermal Properties of Beef Tallow/Coconut Oil Bio PCM Using T-History Method for Wall Building Applications. *EJERS, European Journal of Engineering Research and Science*. Vol. 4, No. 11.
- Vilte M. y Bouciguez A. (2011). Estudio experimental de la convección natural en un proceso de fusión de grasas orgánicas. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 15*, 3, 33-40. ISSN 0329-5184.
- Vilte M. y Esteban S. (2014). Análisis de la distribución de temperaturas en una sustancia que experimenta un proceso de fusión. *Acta de la XXXVII. Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente*. Vol. 2, pp. 03.99-03.108.
- Vilte M., Esteban S. y Toro M. (2017). 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. ISBN 978-987-29873-0-5.
- Zhang Z. y Bejan A. (1989). Melting in an enclosure heated at constant International Journal of Heat Mass Transfer. Vol. 32. No. 6, pp. 1063-1076.

IDENTIFICATION OF REGIMES AND DIMENSIONAL NUMBERS IN THE MELTING OF AN ORGANIC FAT

ABSTRACT: The purpose of this work is the identification of the scale and basic regimes of the melting process of a phase change material (beef fat) in a closed enclosure, heated laterally with a constant heat flow. The analysis of the temporal evolution of the experimentally measured temperatures distribution inside the substance allow to recognize three different heat transfer regimes during the fusion process. Depending on the known physical and thermal parameters of the substance, the Prantl (Pr), Rayleigh (Ra), Stefan (Ste) and Nusselt (Nu) numbers involved in the equations that describe thermal transfer and dynamics of the process are calculated. The order of the Rayleigh number obtained for the experiments carried out is 10^7 . The calculated value of the Prantl number corresponds to that of organic substances. The values obtained from the Nusselt number allow us to explain the interaction between the conductive and convective energy transfer that are established and predominate in the different stages of the fusion of organic fat.

Keywords: phase change, dimensionless numbers, fusion, organic fat, natural convection.