



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SALTA
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS**

Estudio del Fenómeno de Convección Natural en el Proceso de Fusión de Grasas Orgánicas Encerradas en una Cavidad

Tesis de Maestría en Energías Renovables

Maestrando: María del Socorro Vilte

Director: Dra. Angélica Bouciguez

Codirector: Dra. Sonia Esteban

Salta, 5 de julio de 2023

El estudio presentado en esta Tesis corresponde al proceso de fusión de una sustancia orgánica encerrada en un recinto rectangular, el calentamiento se efectúa desde una de las paredes laterales; se analizan dos tipos de transferencia de calor en el proceso: transferencia conductiva y convectiva. Se examina el fenómeno convección que se establece en el interior de la fase líquida que modifica la forma y la rapidez del avance de la frontera sólido-líquido. Se investiga la influencia del espesor y la altura del recinto en el desarrollo de los fenómenos convectivos.

Índice

RESUMEN	5
AGRADECIMIENTOS	6
ESTADO DEL ARTE	7
Bibliografía	9
Nomenclatura	11
Capítulo 1:	12
1. Conceptos previos	12
1.1. El proceso de Fusión	12
1.2. Problema de Stefan.....	13
1.3. Materiales de cambio de fase.	14
1.4. Bibliografía.....	17
Capítulo 2:	19
2. Descripción y modelo físico-matemático del problema	19
2.1. Modelo Físico.....	19
2.2. Modelo Matemático.....	21
2.3. Bibliografía.....	23
Capítulo 3:	24
3. Propiedades físicas y térmicas de la sustancia.....	24
3.1. Caracterización de la sustancia orgánica	24
3.2. Determinación de la densidad, la viscosidad y el Punto de fusión.....	27
3.2.1. Determinación de la densidad	27
3.2.2. Determinación de la Viscosidad.....	29
3.2.3. Determinación del punto de fusión.....	32
3.3. Fenómeno de Sub-enfriamiento	33
3.4. Determinación de la Conductividad y difusividad térmica. Estimación de la Capacidad Calorífica.	34
3.4.1. Formulación del problema.....	34
3.4.1.1. Problema directo.....	34
3.4.1.2. Problema inverso	35
3.4.2. Modelo de cálculo	36
3.4.2.1. Algoritmo computacional	36
3.4.2.2. Comprobación del algoritmo y de su implementación	38

3.4.3.	Ensayo Experimental	39
3.4.3.1.	Medición de las temperaturas	39
3.4.3.2.	Medición del flujo de calor	40
3.4.4.	Resultados Obtenidos.....	41
3.5.	Consideraciones sobre los números adimensionales que caracterizan el proceso de fusión	42
3.6.	Conclusiones	43
3.7.	Bibliografía	44
	Capítulo 4:	45
4.	Comportamiento térmico y visualización del problema. Parte I.....	45
4.1.	Aspectos del abordaje experimental.....	45
4.2.	Antecedente Experimental	46
4.3.	Variación del espesor	48
4.3.1.	Caso 1: Modelos 2, 3, 4 y 5.....	48
4.3.1.1.	Dispositivo Experimental.....	48
4.3.1.2.	Visualización de la interfase: procesos de fusión y solidificación.....	50
4.3.1.3.	Medidas Térmicas	51
4.3.1.4.	Estimación del Coeficiente convectivo sobre la pared calentada	56
4.3.1.5.	Conclusiones	56
4.3.2.	Caso 2: Modelos 6, 7, 8 y 10.....	57
4.3.2.1.	Dispositivo Experimental.....	57
4.3.2.2.	Medidas Térmicas	59
4.3.2.3.	Etapas del Proceso de Fusión. Visualización y medidas térmicas	65
4.3.2.4.	Conclusiones	69
4.4.	Bibliografía	69
	Capítulo 5:	71
5.	Comportamiento térmico y visualización del problema. Parte II.....	71
5.1.	Visualización y análisis del frente de fusión. Modelos 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 y 10.	71
5.1.1.	Dispositivo experimental	71
5.1.2.	Resultados Obtenidos.....	73
5.1.2.1.	Evolución temporal del Frente de Fusión	74
5.1.2.2.	Rapidez del frente de fusión.....	75
5.1.2.3.	Evolución temporal de la Fracción de Líquido	79
5.1.3.	Conclusiones	80

5.2. Variación de la altura: Modelo 1 (25 cm de altura) y Modelo 2 (30 cm de altura)	80
5.2.1. Dispositivo experimental.....	81
5.2.2. Resultados obtenidos	82
5.2.2.1. Medidas térmicas.....	82
5.2.2.2. Fenómeno de sub-enfriamiento en la grasa orgánica estudiada	87
5.2.2.3. Gradientes de temperaturas	88
5.2.2.3.1. Gradientes horizontales	89
5.2.2.3.2. Gradientes verticales	91
5.2.2.4. Visualización del proceso.....	93
5.2.2.4.1. Características del avance del frente de fusión.....	93
5.2.2.4.2. Determinación de la fracción líquida.....	95
5.2.3. Conclusiones.....	97
5.3. Bibliografía.....	98
Capítulo 6:	99
6. Acondicionamiento térmico de un local con material de cambio de fase. Simulación.	99
6.1. Abordaje experimental	99
6.1.1. Dispositivo.....	99
6.1.2. Resultados experimentales obtenidos.....	101
6.2. Consideraciones acerca del coeficiente convectivo.....	102
6.3. Simulación numérica.....	104
6.4. Conclusiones	110
6.5. Bibliografía.....	111
Capítulo 7: Conclusiones Generales	112
ANEXO 1: Visualización del Proceso de fusión en diferentes geometrías y diferentes condiciones de calentamiento	118
1. Observaciones cualitativas del proceso de fusión	118
2. Visualización de la evolución temporal de la interfase	119
2.1. Calentamiento inferior	119
2.1.1. Recinto de base circular.....	119
2.1.2. Recintos de base rectangular	120
2.2. Calentamiento lateral. Recinto de base rectangular	121

ANEXO 2: Determinación de la densidad, conductividad y difusividad térmica. Estimación de la Capacidad Calorífica	122
ANEXO 3:Sistema de calentamiento: aspectos relativos a la construcción, disposición y homogeneidad del flujo de calor generado.....	124
ANEXO 4: Aplicación: refrigeración pasiva de paneles fotovoltaicos empleando el material de cambio de fase estudiado: primer jugo bovino.....	127
Bibliografía	129
Índice de Tablas	130
Índice de Figuras	131

RESUMEN

El estudio presentado en esta Tesis corresponde al proceso de fusión de una sustancia orgánica encerrada en un recinto rectangular, el calentamiento se efectúa desde una de las paredes laterales.

Se determinan experimentalmente propiedades físicas del material de cambio de fase empleado, como: densidad, viscosidad y punto de fusión; parámetros que son necesarios para la simulación del proceso de fusión de dicha sustancia. Por otro lado, se aplica la técnica de solución del problema inverso de conducción de calor para la estimación de la conductividad térmica, la difusividad térmica y la capacidad calorífica; propiedades involucradas en los procesos de cambio de fase.

Se examina el fenómeno convección que se establece en el interior de la fase líquida que modifica la forma y la rapidez del avance de la frontera sólido-líquido. Se investiga la influencia del espesor y la altura del recinto en el desarrollo de los fenómenos convectivos. Los resultados muestran la importancia de considerar no solo la transferencia conductiva sino también la convección natural durante la fusión en el material de cambio fase. El estudio detallado de la distribución de temperaturas en el interior del recinto, permite evaluar los gradientes de temperaturas que son responsables del establecimiento y desarrollo de la transferencia de calor convectiva y conductiva dentro de la cavidad, así como la forma y rapidez del avance de la frontera en el proceso de fusión.

Por otro lado, se determina la evolución temporal de la fracción de líquido a partir de los registros fotográficos del proceso para diferentes espesores de la muestra; como así también la rapidez de avance del frente de fusión en las adyacencias de algunas paredes del recinto.

Finalmente, se estudia numéricamente (programa SIMUSOL) el comportamiento térmico de un recinto empleando la sustancia de cambio de fase ensayada. Los valores de temperatura obtenidos numéricamente concuerdan con los experimentales con diferentes grados de aceptación, según la correlación empleada para el coeficiente convectivo.

AGRADECIMIENTOS

- A Dios y a la maravillosa familia que Él me regaló.
- A mi Directora Angélica Bouciguez y a mi codirectora Sonia Esteban que estimularon mi trabajo.
- A la Universidad y a mis compañeros de trabajo que de diversas maneras me apoyaron.
- A mis amigos que siempre me alentaron para dar lo mejor.

ESTADO DEL ARTE

En nuestros días, el creciente consumo de energía, el incremento del precio de los combustibles fósiles y el consecuente agotamiento de las reservas hace que el uso de materiales de cambio de fase (PCM) resulte una elección atractiva, ya que aporta soluciones no solo al reemplazo de los combustibles tradicionales, sino y fundamentalmente a la preservación del ambiente. Los materiales de cambio de fase 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, respectivamente. 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).

El uso de materiales de cambio de fase (PCM) es una de las herramientas más prometedoras hoy en día y encuentra su aplicación en diversos campos, incluidos los sistemas de almacenamiento de energía para edificios, los sistemas de recuperación de calor residual, las fibras termorreguladoras, los materiales textiles inteligentes, la gestión térmica de las baterías, el control de temperatura de componentes microelectrónicos, las aplicaciones fotovoltaicas térmicas (PV/T), las aplicaciones de almacenamiento de energía térmica espacial y terrestre, y la regulación de temperatura de invernaderos, receptáculos con protección térmica para alimentos o fármacos etc. (Nasir et al, 2019). 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 la misma.

La formulación matemática que describe el proceso físico de cambio de fase (solidificación o fusión) se conoce en la literatura como problema de Stefan (en algunos casos, como problema de Lamé-Clapeyron-Stefan). El problema de Stefan de cambio de fase en el que un material se funde o solidifica está presente en una amplia variedad de procesos naturales e industriales. Matemáticamente es un problema de condición de contorno para una ecuación diferencial en derivadas parciales para el campo de temperatura. La frontera de cambio de fase se desplaza en el tiempo y se desconoce su ubicación, la que debe ser determinada como parte de la solución. Aunque gran parte de las investigaciones científicas (Webb y Viskanta, 1986; Benard et al, 1985) se ha dedicado al problema Stefan clásico en la que el cambio de fase se produce debido a un calentamiento o enfriamiento a temperatura constante, la situación de mayor relevancia práctica es en la que se impone un flujo de calor (Zhang Z. and Bejan A., 1989; Fadl M. and Eames, P. C., 2019). En general, no hay soluciones analíticas disponibles para estos casos y por lo tanto los abordajes experimentales y los métodos numéricos son necesarios.

La posibilidad de acumulación de energía con materiales de cambio de fase (PCM), 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 otro lado, esta tesis se desarrolla en los laboratorios del Departamento de física de la Universidad Nacional de Salta, INENCO (Instituto de energías no convencionales) en el marco de un Grupo de Investigación en Cambio de fase. En los últimos años se ha venido trabajando mayormente en solución analítica y simulación numérica de problemas de cambio de fase, en diferentes geometrías y condiciones iniciales y de borde. Parte de este trabajo de tesis corresponde al abordaje experimental del proceso de cambio de fase y posibles aplicaciones relacionadas con la energía solar. En razón de ello y de los antecedentes tenidos en cuenta para la realización de este trabajo, se plantea estudiar experimentalmente el comportamiento térmico de un material de cambio de fase y evaluar el efecto del espesor de una pared con la sustancia mencionada en presencia de los fenómenos de conducción y convección natural.

El objetivo de esta Tesis es estudiar el comportamiento térmico de un material de cambio de fase en el interior de una cavidad rectangular de diferentes espesores y analizar su efecto en la convección natural y en el avance de la frontera. Para ello se analizan los efectos conductivos y convectivos del proceso, a partir de las medidas experimentales de temperatura. Se estudia la influencia de la convección natural en el avance de la frontera mediante la visualización del proceso de fusión.

La sustancia empleada es una grasa vacuna, disponible en plaza y de costo accesible, aspectos que hicieron posible el desarrollo de esta Tesis desde el punto de vista experimental. Además, la manipulación de este material es relativamente sencilla en cuanto al llenado y remoción del mismo de los recipientes que lo contienen. Para facilitar la visualización del proceso se construyen recintos a escala de laboratorio, en vidrio y acrílico.

Desde el punto de vista experimental se ha efectuado:

- Determinación de algunas propiedades térmicas de la sustancia, no disponibles en la literatura: densidad (ρ), viscosidad (μ), conductividad térmica (k), capacidad calorífica (C) y difusividad térmica (α).
- Medición de temperaturas para estudiar el comportamiento térmico de la sustancia en las etapas de calentamiento y enfriamiento; en las que se producen los procesos de fusión y solidificación de la sustancia, respectivamente.
- Visualización del proceso de fusión mediante registros fotográficos para analizar los efectos de la geometría, en la forma y avance de la frontera sólido-líquido.

Desde el punto de vista numérico se ha realizado:

- Determinación de algunas de las propiedades termofísicas de la sustancia orgánica ensayada
- Acondicionamiento de locales con la sustancia orgánica estudiada.

Bibliografía

1. Benard C., Gobin D. and Zanolli A. 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, No II, pp. 1669-1681, 1986.
2. Castell Albert, Farid Mohammed M., Experimental validation of a methodology to assess PCM effectiveness in cooling building envelopes passively, *Energy Build.* 81 (October 2014) 59e71.
3. David D., Kuznik F., Roux J.J. Numerical study of the influence of the convective heat transfer on the dynamical behaviour of a phase change material Wall. *Applied Thermal Engineering* 31 (2011) 3117-3124.
4. Dhaidan Nabeel S., Khodadadi J.M. Melting and convection of phase change materials in different shape containers: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 43 (2015) 449–477
5. F. Kuznik, J. Virgone, J.J. Roux, Energetic efficiency of room wall containing PCM wallboard: a full scale experiment, *Energy Build.* 40 (2008) 148e156.
6. Fadl M. and Eames, P. C. An experimental investigations of the melting of RT44HC inside a horizontal rectangular test cell subject to uniform wall heat flux. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 140 (2019) 731–742.
7. Hamad F.A., Egelle E., Cummings K., Russell P. Investigation of the melting process of polyethylene glycol 1500 (PEG 1500) in a rectagular enclosure. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 114 (2017) 1234–1247.
8. Hamdan M. A. and Elwerr F. A. Thermal energy storage using a phase change material. *Solar Energy* Vol. 56, No. 2, pp. 183-189, 1996.

9. Lee Kyoung Ok, Medina Mario A., Raith Erik, Sun Xiaoqin, 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 (January 2015) 699e706.
10. Liu Hongim, Awbi Hazim B., Performance of phase change material boards under natural convection, *Build. Environ.* 44 (9) (2009) 1788e1793.
11. Mohamed S. A., Al-Sulaimana F. A., Ibrahima N. I., Zahira Md. H., Al-Ahmeda A., Saidura R., Yılbaş B. S., Sahina A. Z.. A review on current status and challenges of inorganic phase change materials for thermal energy storage systems. *Renewable Energy* 107 (2017) 1072–1089.
12. Nazir H., Batool M., Bolívar Osorioc F. J., Isaza-Ruiz M., Xu X., Vignarooban K., Phelanf P., Inamuddin, Arunachala M. K.. Recent developments in phase change materials for energy storage applications: A review. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 129 (2019) 491–523.
13. Webb and Viskanta R., Analysis of heat transfer during melting of a pure metal from an isothermal vertical wall, *Numerical Heat Transfer* 9 (1986) 539±558.
14. Zhang Z. and Bejan A. Melting in an enclosure heated at constant International Journal of Heat Mass Transfer. Vol. 32. No. 6, pp. 1063-1076, 1989.

NOMENCLATURA

T_o	temperatura ambiente o de laboratorio ($^{\circ}\text{C}$)	Letras Griegas	
T_F	temperatura de fusión ($^{\circ}\text{C}$)	ρ	densidad (kg/m^3)
T_{Sol}	temperatura de solidificación ($^{\circ}\text{C}$)	μ	viscosidad (kg/m s)
T^L	temperatura del líquido ($^{\circ}\text{C}$)	α	difusividad térmica (m^2/s)
T^S	temperatura del sólido ($^{\circ}\text{C}$)	β	coeficiente de expansión térmica ($1/\text{K}$)
ΔT^L	diferencia de temperatura en el líquido, $T^L - T_F$	Supra-índices	
ΔT^S	diferencia de temperatura en el sólido, $T_F - T^S$	S	<i>estado sólido</i>
k	conductividad ($\text{W/m}^{\circ}\text{C}$)	L	<i>estado líquido</i>
C	capacidad calorífica ($\text{J/kg } ^{\circ}\text{C}$)	V	voltaje (V)
H	altura de la cavidad (m)	R	resistencia (Ω)
L	ancho de la cavidad (m)	t	tiempo (s)
H/L	relación de aspecto	T	temperatura ($^{\circ}\text{C}$)
W	profundidad de la cavidad (m)	L_F	calor latente de fusión (J/kg)
x	coordenada horizontal (m)	$s(t)$	posición del frente de fusión (m)
y	coordenada vertical (m)	F_r	fracción de líquido
u	velocidad horizontal (m/s)	G_x	gradiente en la dirección x ($^{\circ}\text{C/m}$)
v	velocidad vertical (m/s)	G_y	gradiente en la dirección y ($^{\circ}\text{C/m}$)
Q	calor (J)	Números adimensionales	
q''	flujo de calor (W/m^2)	Ste	$(C_L \Delta T^L / L_F)$ número de Stefan
g	aceleración de la gravedad (m/s^2)	Ra	$(g \beta \Delta T L^3 / \alpha \nu)$ número de Rayleigh
P	presión (N/m^2)	F_o	$(\alpha t / L^2)$ número de Fourier
h	coeficiente convectivo ($\text{J/m}^2\text{ } ^{\circ}\text{C}$)		

Capítulo 1:

1. Conceptos previos

1.1. El proceso de Fusión

La fusión (solidificación) es el proceso mediante el cual la materia pasa de estado sólido (líquido) a líquido (sólido), al variar las condiciones de presión y/o temperatura a las que se encuentra sometida. Ambos procesos son reversibles en el sentido de que la materia no se transforma químicamente, es decir, no se producen cambios químicos (constitutivos) sino solo físicos. Cada material posee un punto de fusión (temperatura) a partir del cual cambia de fase y pasa del estado sólido al estado líquido: lo contrario es el punto de solidificación en el que pasan a sólido los líquidos. Mientras más alto sea dicho punto de fusión, más energía térmica necesitará el sólido para fundirse, o para transformarse en líquido.

Diferentes mecanismos actúan cuando un sólido se funde o un líquido se solidifica, tales como fenómenos de transferencia de calor, transferencia de masa, sub-enfriamiento, absorción o cesión de calor latente, cambios en las propiedades termofísicas, efectos superficiales, etc. Todos estos procesos son descritos por las ecuaciones de Navier-Stokes que expresan matemáticamente los principios de conservación de la masa, de la cantidad de movimiento y de la energía. Estrictamente hablando, solo las dos primeras son conocidas como ecuaciones de Navier-Stokes, pero la comunidad científica normalmente utiliza este nombre cuando se refiere a todas ellas. Estas ecuaciones son un conjunto de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales, no-lineales y fuertemente acopladas.



Figura 1.1: La frontera libre en un vaso con hielo.

El cambio de fase más simple y fácil de observar es el de sólido a líquido, para ello se considera, un recipiente (figura 1.1), que contiene una cierta cantidad de agua a una temperatura cercana a 0°C . Para los fines prácticos se sabe que el *punto de fusión* del agua pura

a 1 atmósfera de presión es muy cercano a 0°C . El agua en su fase líquida está en el fondo, por debajo de una capa de hielo que flota en la superficie. El espesor de esa capa de hielo crecerá o disminuirá según cómo evolucione en el tiempo la temperatura del medio exterior. En cada instante de tiempo se puede observar una superficie bien definida que separa la región donde se encuentra la fase líquida de la sólida, esta superficie es conocida como frontera libre.

1.2. Problema de Stefan

Generalmente, para explicar el concepto de frontera libre se utiliza el problema de Stefan. El problema de cambio de fase conocido en la literatura como el problema de Stefan, nace con el trabajo de G. Lamé y B.P. Clapeyron en el año 1831, sobre el proceso de solidificación de un globo líquido. Entre los años 1889 y 1891 J. Stefan estudió nuevamente este tipo de problema en sus trabajos sobre el crecimiento del espesor del hielo en el agua a bajas temperaturas, de este modo se inició una línea de investigación que por su diversidad de aplicaciones y complejidad desde el abordaje teórico o experimental ha generado numerosos trabajos de investigación.

En la formulación matemática de dichos problemas la posición de la frontera libre es desconocida y debe ser determinada como parte de la solución del problema, además de la distribución de temperatura en cada punto interior del volumen que ocupa cada fase, o sea la temperatura en las regiones sólida y líquida.

En general se habla de problema de Stefan a una fase cuando se trata de hallar dos incógnitas: la evolución temporal de la posición de la frontera libre y el campo de temperatura en la fase líquida, de un material que inicialmente se encontraba en la fase sólida a la temperatura de fusión, la fase sólida continua siempre a la temperatura de fusión (figura 1.2).

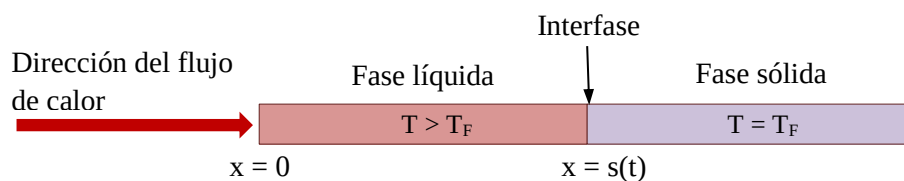


Figura 1.2: Esquema del Problema de Stefan a una fase.

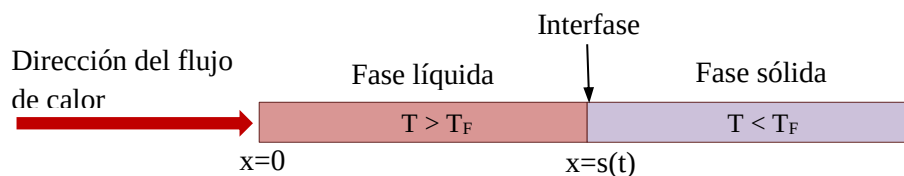


Figura 1.3: Esquema del Problema de Stefan a dos fases.

En un problema de Stefan a dos fases, se trata de hallar tres incógnitas: la evolución temporal de la posición frontera libre y el campo de temperaturas en las fases líquida y sólida respectivamente (figura 1.3).

Este último planteo resulta más realista en la práctica. De todos modos, en vistas de las aplicaciones, el problema básico de Stefan puede ser modificado y complejizado, en cuanto a las características de los dominios considerados, las condiciones iniciales y de contorno, la variación de las propiedades termofísicas de los materiales involucrados, etc.

En este trabajo de Tesis, se aborda un problema de frontera libre en un dominio finito, se estudia el proceso de fusión en el interior de una cavidad rectangular con calentamiento a través de una de sus paredes laterales. En particular, la fusión de materiales de cambio de fase en recintos rectangulares con condición de frontera de flujo de calor constante, es de gran importancia por la diversidad de aplicaciones en campos tales como el acondicionamiento térmico y el almacenamiento de energía térmica (David D. et al., 2010; Dhaidan N. y Khodadadi J., 2013).

1.3. Materiales de cambio de fase.

La energía térmica se puede almacenar de tres formas: como calor sensible, calor latente y termoquímico. Entre estos, el almacenamiento como calor latente ofrecido por un gran número de materiales de cambio de fase (PCM) se considera una opción muy interesante debido a que presentan las siguientes ventajas:

- La densidad de almacenamiento de calor es muy superior comparado al calor sensible, son capaces de almacenar o liberar grandes cantidades de energía (hasta 100 veces más que si emplea el calor sensible).
- Durante el cambio de fase, el calor se acumula o se libera a temperatura constante.

La energía térmica se almacena en un material como calor latente al derretirse (descongelarse), esta energía almacenada puede utilizarse cuando se requiera, mientras el material se congela (solidifica). Los PCM son óptimos en aplicaciones de ingeniería, incluida la tecnología de enfriamiento electrónico, el confort térmico en viviendas, diseño textil y la calefacción, ventilación y aire acondicionado.

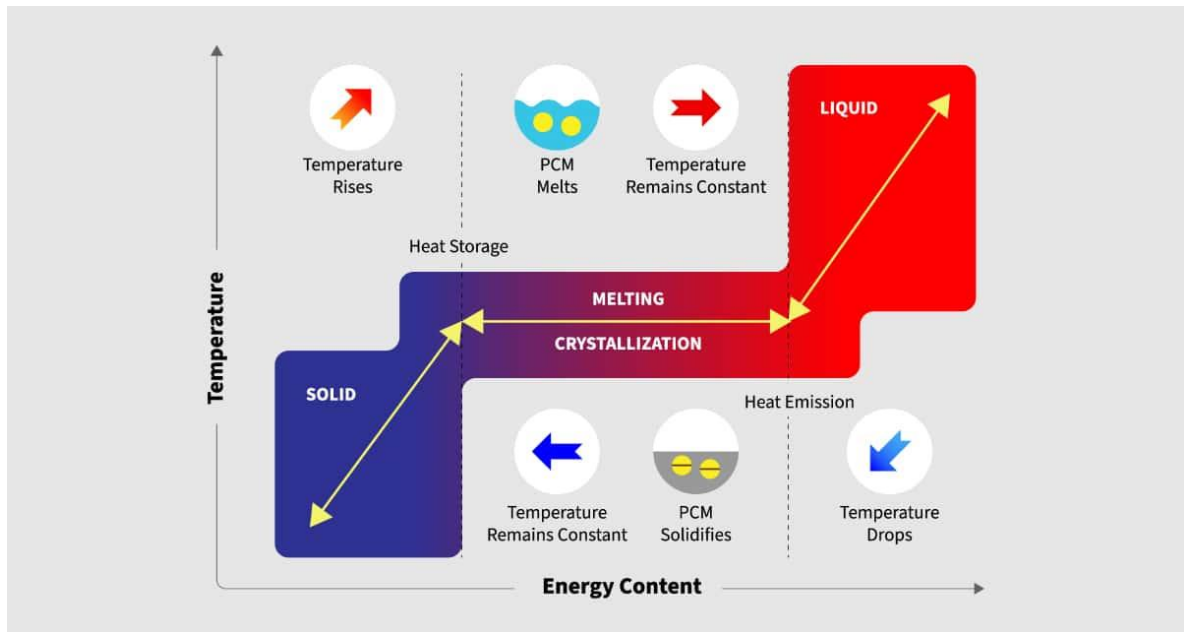


Figura 1.4: Comportamiento térmico de los materiales de cambio de fase. Fuente: <https://thermtest.com/latinamerica/materiales-de-cambio-de-fase-pcm>

Como se mencionó en el caso de las energías renovables, los PCM permiten realizar una gestión térmica más eficiente, debido a su alta capacidad de almacenaje de energía en forma de calor latente, porque pueden reducir el desajuste de tiempo y velocidad entre la oferta y la demanda de energía y por su comportamiento isoterma (figura 1.4) durante el periodo de acumulación o liberación de calor. Por ejemplo, en un sistema con colector solar, durante el día se almacena el exceso de calor y se puede disponer del mismo por la noche y durante las primeras horas del día siguiente cuando todavía no se dispone de radiación solar (figura 1.5).

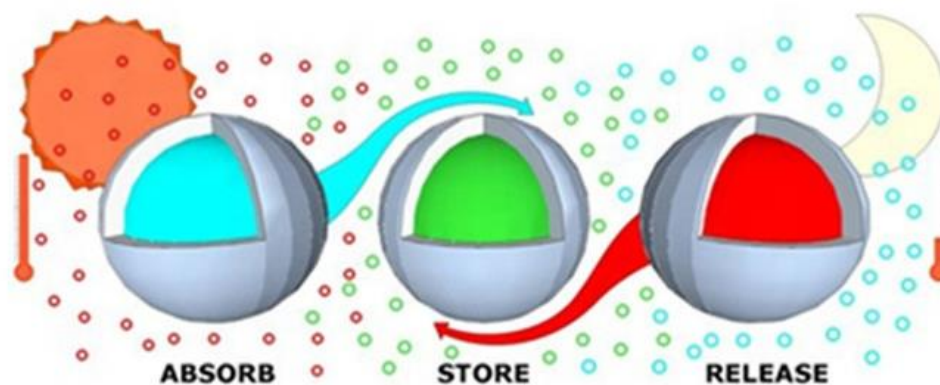


Figura 1.5: Comportamiento de los materiales de cambio de fase ante la oferta y la demanda de energía. Fuente: <https://www.aiaaustin.org/event/phase-change-materials-pcm-high-performance-enclosures>

También, pueden actuar como reguladores térmicos, reduciendo las oscilaciones térmicas de un espacio, en torno a la temperatura de cambio de fase del PCM, con lo que se consigue

reducir la dependencia con los sistemas de climatización convencionales y por tanto un ahorro energético. Por ejemplo, en las viviendas es posible reducir las oscilaciones de temperatura en torno a la temperatura confort (25 °C).

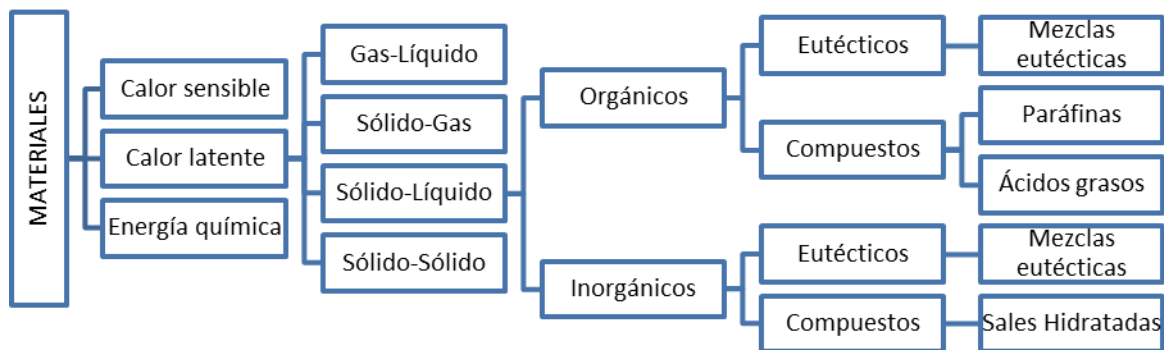


Figura 1.6: Clasificación de materiales de cambio de fase.

La temperatura de cambio de fase es característica de cada PCM, se los suele denominar materiales inteligentes y pasivos, los cuales actúan de manera reversible en base a las condiciones térmicas del entorno.

En la Figura 1.6 se representa la clasificación de las sustancias usadas para almacenamiento térmico, (Abhat A, 1983). Los materiales con cambios de fase sólido-líquido son los más empleados, ya que, aunque la cantidad de energía almacenada es inferior que, entre otros cambios de estado, la variación de volumen es menor. Esto hace que se los pueda incorporar en diversos materiales sin problemas asociados a la expansión o contracción de volumen. En la clasificación mencionada se puede observar que en el caso de los PCM empleados en transiciones de fase sólido-líquido y viceversa, los mismos pueden agruparse en orgánicos e inorgánicos. En la figura 1.7 se indican ventajas y desventajas de ambos grupos.

Dependiendo de la aplicación, los materiales de cambio de fase líquido-sólido más comunes en el rango de temperaturas 20 °C y 80 °C son las ceras de parafina, sales hidratadas, mezclas eutécticas y ácidos grasos.

Diversos autores, señalan que las sustancias orgánicas son más estables que las inorgánicas y soportan más ciclos de fusión - solidificación sin alterar significativamente sus propiedades térmicas. (Hasan y Sayigh, 1994; Feldman et al., 1995; Stritih, 2003; Farid et al., 2004)

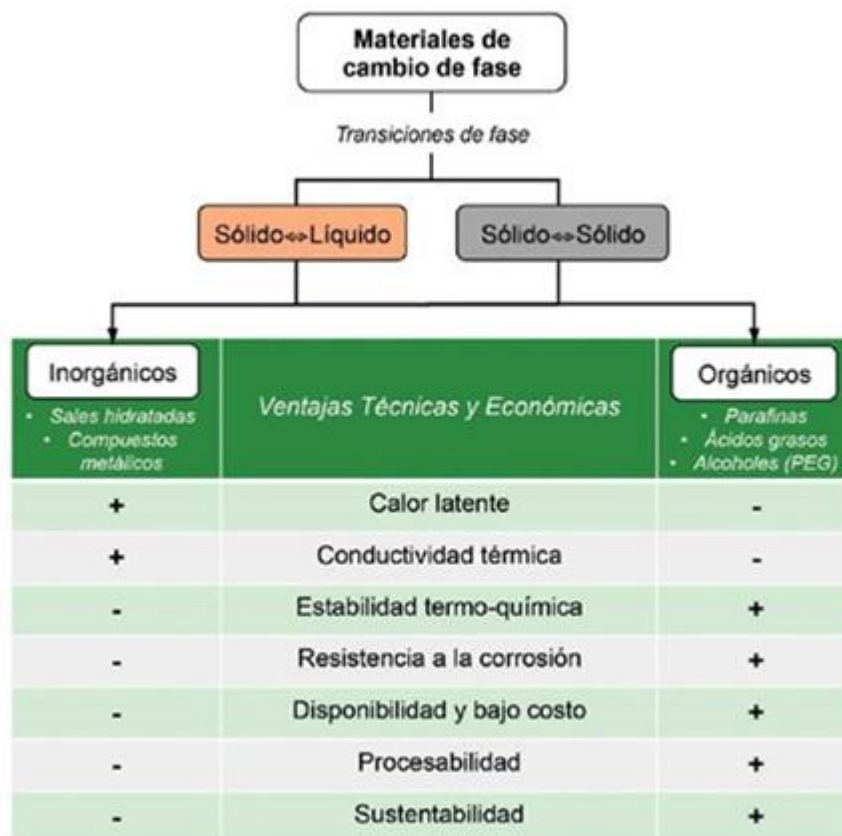


Figura 1.7: Ventajas técnicas y económicas de materiales de cambio de fase orgánicos e inorgánicos. Extraído de [Materiales inteligentes para la conversión y almacenamiento de energía | Plastics Technology México \(pt-mexico.com\)](#)

Se ha determinado que las grasas orgánicas son económicamente muy accesibles y con gran disponibilidad en plaza; poseen además una temperatura de fusión y calor latente de fusión que hace interesante su estudio desde el abordaje experimental. (Boucíguez y Lara, 2005; Vilte y Boucíguez, 2007).

1.4. Bibliografía

1. Abhat A. Low temperature latent heat thermal energy storage-heat storage Materials. Sol Energy 1983; 30: 313-32.
2. Boucíguez, A y Lara, M. 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, 2005. Vol. 16, pág. 29 - 33. ISSN 0328-932X.
3. David D., Kuznik F., Roux Jean-Jacques (2011). Numerical study of the influence of the convective heat transfer on the dynamical behaviour of a phase change material wall. Applied Thermal Engineering 31, 3117-3124. Available online www.sciencedirect.com.

4. Dhaidan N. S. and Khodadadi J.M. Melting and convection of phase change materials in different shape containers: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 43 (2015) 449–477.
5. Farid, M; Khudhair, A; Razack, S; Al-Hallaj, S. A Review on Phase Change Energy Storage: Materials and Applications. *Energy Conversion and Management* 45, 1597 – 1615, 2004.
6. Feldman, D; Banu, D; Hawes, D. 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, 1995.
7. Hasan, A.; Sayigh, A., Some Fatty Acids as Phase Change Thermal Energy Storage Materials. *Renewable Energy*, Vol. 4, N° 1, pp. 69 – 76, 1994.
8. Stritih, U. Heat Transfer Enhancement in Latent Heat Thermal Storage System for Building. *Energy and Building*, 35, pp 1097 – 1104, 2003.
9. Vilte, M y Bouciguez, A. Estudio Experimental del Comportamiento Térmico de Grasas Organicas. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. Pg. 25-30. Vol. 11, 2007. Impreso en la Argentina. ISSN 0329-5184.
10. Materiales inteligentes para la conversión y almacenamiento de energía | *Plastics Technology México* (pt-mexico.com)
11. <https://thermtest.com/latinamerica/materiales-de-cambio-de-fase-pcm>
12. <https://www.aiaaustin.org/event/phase-change-materials-pcm-high-performance-enclosures>

Capítulo 2:

2. Descripción y modelo físico-matemático del problema

2.1. Modelo Físico

El estudio del proceso de fusión de una sustancia de cambio de fase se realiza empleando recintos rectangulares de altura (H), ancho (L) y profundidad (W) que se encuentran aislados térmicamente, excepto en la pared vertical en la que se suministra un flujo de calor constante. Inicialmente, el recinto se encuentra con el material sólido a temperatura uniforme T_0 del laboratorio ($T_0 < T_F$). En el tiempo $t = 0s$, 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_0). Se supone que las demás paredes del recinto son adiabáticas. Se deja un espacio de aire en la parte superior del recinto para permitir la expansión volumétrica del PCM en el proceso de fusión. En la figura 2.1 se muestra una sección transversal vertical (en el plano xy) del recinto rectangular que contiene el PCM. Con u y v se designan las velocidades en la dirección horizontal y vertical respectivamente. El flujo de calor a lo largo de la pared izquierda se especifica mediante:

$$q_x'' = -k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} \quad (2.1)$$

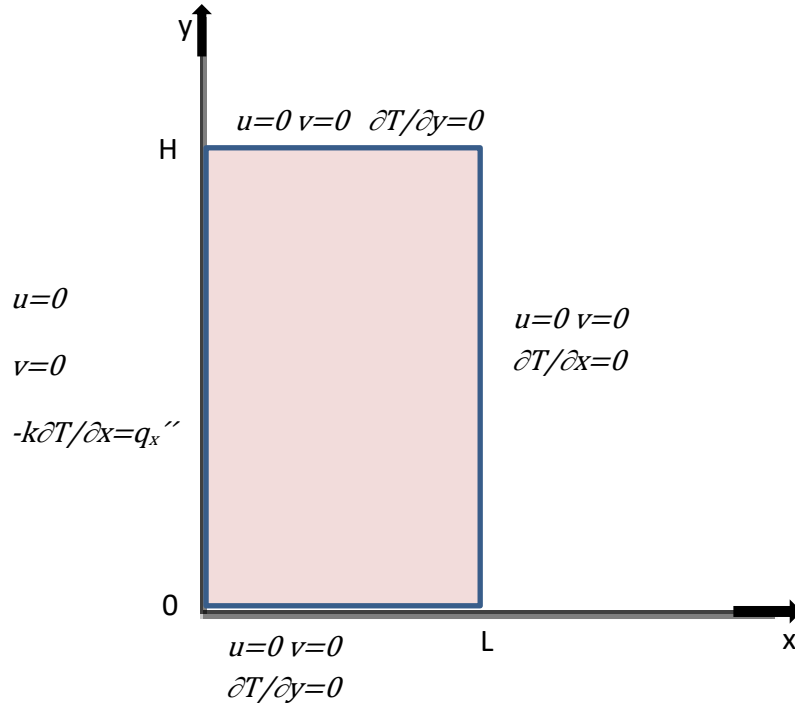


Figura 2.1: Esquema del modelo matemático y el sistema de coordenadas.

En este abordaje experimental del proceso se realizaron algunos supuestos:

- Hipótesis sobre el PCM líquido: es incompresible, el fluido es newtoniano y satisface la aproximación de Boussinesq.
- Las propiedades termofísicas de las fases líquida y sólida son constantes en el intervalo de temperaturas de interés.
- Se desprecia el cambio de volumen del material durante el cambio de fase.

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 , lo que se confirma en los ensayos del capítulo 5. Se considera que, durante el proceso de fusión, la transferencia de calor se realiza por conducción y por convección, se desestiman las transferencias térmicas por radiación en el sistema considerado.

Al comenzar el calentamiento, como ya se mencionó el PCM se encuentra inicialmente a la temperatura ambiente del laboratorio; 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 (figura 2.2). Los registros fotográficos del proceso hacen posible evaluar la fracción de líquido presente en función del tiempo, seguir el proceso de fusión visualizando la evolución de la transferencia conductiva al régimen de convección natural.

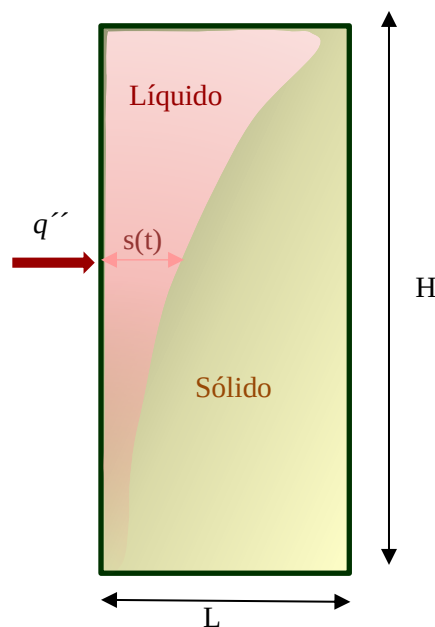


Figura 2.2: Modelo físico del desarrollo del proceso de fusión.

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, donde la frontera se desplaza más rápidamente hacia la pared opuesta dejando de ser la capa líquida, una capa de espesor constante.
- 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 estas experiencias, en base a las medidas térmicas y a los registros fotográficos del proceso.

2.2. Modelo Matemático

Dentro de la sustancia grasa orgánica, la posición de la frontera (interfase sólido-líquido) y el campo de temperatura en la sustancia sólida se indican con $s(t)$ y $T(x, y, t)$, respectivamente. Con S (como supraíndice) se representa la fase inicial (sólida en este caso) y con L , la fase líquida. El conjunto completo de ecuaciones (2.2 a 2.14) que describen el proceso son:

-En el dominio sólido, el término transitorio en la ecuación de conducción se conserva, ya que el tiempo característico de difusión del calor es del mismo orden de magnitud que la escala de tiempo del proceso de fusión.

$$\alpha^S \frac{\partial^2 T^S}{\partial x^2} = \frac{\partial T^S}{\partial t} \quad x \geq s(t), \quad t > 0 \quad (2.2)$$

-En la fase líquida, el planteamiento matemático del problema corresponde a un flujo movido por convección natural en el interior del recinto y es definido por las ecuaciones de continuidad, cantidad de movimiento y energía. En el estudio se emplea la aproximación de Boussinesq que considera que las propiedades físicas del fluido son independientes de la temperatura. La densidad, ρ , del fluido se toma como constante, ρ_o , excepto en el término de fuerza de flotación:

$$\rho = \rho_o [1 - \beta(T - T_o)] \quad (2.3)$$

En esta ecuación la densidad se considera como una función lineal de la temperatura, donde β es el coeficiente de expansión volumétrico y ρ_o es la densidad a la temperatura de referencia T_o . Bajo las condiciones ya mencionadas, las ecuaciones de movimiento para flujo laminar convectivo considerando capa límite son (Bejan, 1993):

$$\forall y, \quad 0 \leq x \leq s(t), \quad t > 0$$

Ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (2.4)$$

Ecuación de momento en x:

$$\rho_o \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (2.5)$$

Ecuación de momento en y:

$$\rho_o \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - \rho_o g \beta (T - T_o) \quad (2.6)$$

Ecuación de energía:

$$\rho_o C \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (2.7)$$

Condición en la frontera libre:

$$T^S(s(t), t) = T^L(s(t), t) = T_F \quad (2.8)$$

Condición de Stefan (interfase sólido-líquido):

$$\rho L \frac{ds(t)}{dt} = -k^L \frac{\partial T^L(s(t)^-, t)}{\partial x} + k^S \frac{\partial T^S(s(t)^+, t)}{\partial x} \quad (2.9)$$

Condición inicial:

$$T(x, y, 0) = T_o \quad (2.10)$$

Las condiciones de borde para el sistema son:

$$u = v = 0 \quad \frac{\partial T}{\partial x} = -\frac{1}{k} q_x'' \quad \text{en } x = 0, \quad 0 \leq y \leq H \quad (2.11)$$

$$u = v = 0 \quad \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad \text{en } x = L, \quad 0 \leq y \leq H \quad (2.12)$$

$$u = v = 0 \quad \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \quad \text{en } y = 0, \quad 0 \leq x \leq L \quad (2.13)$$

$$u = v = 0 \quad \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \quad \text{en } y = H, \quad 0 \leq x \leq L \quad (2.14)$$

Donde T_F es la temperatura de fusión. Es importante notar que para $t=0$ la posición de la frontera es $s(t)=0$. Además u es la velocidad horizontal, v la velocidad vertical, x la coordenada horizontal, y la coordenada vertical, T la temperatura, g la aceleración gravitatoria, μ la viscosidad dinámica, C el calor específico y k la conductividad térmica, P la presión, ρ la densidad y q_x'' el flujo de calor. En el caso considerado T_o es la temperatura ambiente o de

laboratorio. Los valores de conductividad térmica, calor latente y densidad de la sustancia de cambio de fase corresponden a los valores que se determinarán en el capítulo siguiente.

2.3. Bibliografía

1. Benard C., Gobin D. and Zanolli A. 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, No II, pp. 1669-1681, 1986.
2. Bejan, A., *Heat Transfer*, John Wiley & Sons, Inc. 1993.

Capítulo 3:

3. Propiedades físicas y térmicas de la sustancia

3.1. Caracterización de la sustancia orgánica

Las grasas y los aceites son triglicéridos, compuestos por una molécula de glicerol esterificado con tres moléculas de ácidos grasos iguales o distintos. El estado sólido de las grasas se debe a que las cadenas carbonadas de los ácidos grasos constituyentes son en su mayoría saturadas, mientras que para los aceites son insaturados. Se entiende por grasa al glicérido que permanece sólido a la temperatura de 20 °C y por aceite el glicérido que permanece líquido a 20 °C. Se consideran grasas animales comestibles, las grasas que provengan de animales de consumo permitido aptas para el consumo humano. Se designarán de acuerdo con la especie de que provengan.

Las grasas animales son obtenidas por distintos procedimientos a partir de depósitos adiposos de animales, en perfecto estado sanitario. El primer jugo bovino y ovino, respectivamente, es el producto resultante de la fusión de la grasa cruda en rama, que no ha sufrido separación alguna de su proporción natural de óleo estearina u óleo margarina. Puede efectuarse su fusión por el método generalizado de recipiente abierto con doble fondo y camisa a vapor a temperatura inferior a 80 °C, o bien mediante la aplicación de otras prácticas tecnológicas, basadas en el empleo de temperaturas y presiones diferentes que permitan la extracción de un primer jugo de calidad igual o mejor que la obtenida por los métodos en uso.

En particular, se denomina primer jugo bovino al que se obtiene por fusión suave a partir de tejidos de animales bovinos y es el que se adquiere comercialmente. Por lo general el primer jugo bovino es el sebo que se obtiene por procesado al vapor de tejidos grasos frescos seleccionados. Tiene un suave y agradable olor y sabor característicos a "grasa fresca", es un producto de excelente plasticidad y adecuada integración en los amasijos. (Usos: frituras en grasa o la incorporación de grasas en el amasado). Se trata de un producto tradicional en la cocina argentina, reemplazando al aceite o margarina en la elaboración de frituras, masas, etc. Es un producto muy noble dado que se prepara con grasas provenientes de la propia faena que son inmediatamente procesadas y envasadas otorgándole de este modo mayor frescura y por consiguiente un mayor período de aptitud. Por sus características puede ser conservado en lugar fresco sin necesidad de heladera aún después de abierto el envase. Se lo obtiene líquido, fundido, se lo moldea y se lo vende en panes de medio o de un kilo, para uso familiar o cajas de 20 kg para uso industrial, panificaciones, etc.

El Código Alimentario Argentino que regula a todos los alimentos, condimentos, bebidas o sus materias primas y los aditivos alimentarios que se elaboren, fraccionen, conserven, transporten, expendan o expongan, así como a toda persona, firma comercial o establecimiento

que lo haga en todo el territorio de Argentina. Tiene una serie de leyes que se deben cumplir para que un producto elaborado se comercialice, de lo contrario el producto no puede ser consumido ya que podría ser un elemento adulterado además de ser ilegal. El Código Alimentario Argentino fue puesto en vigencia por la Ley 18.284, reglamentada por el Decreto 2126/71, y cuyo Anexo I es el texto del Código. Se trata de un reglamento técnico en permanente actualización que establece las normas higiénico-sanitarias, bromatológicas, de calidad y genuinidad que deben cumplir las personas físicas o jurídicas, los establecimientos, y los productos que caen en su órbita. Con respecto a la grasa estudiada 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 3.1 a) se muestra al aspecto de la sustancia, donde se puede apreciar el color y la textura y en la figura 3.1 b) una presentación comercial de la misma.



Figura 3.1: Sustancia de cambio de fase estudiada (primer jugo bovino). Fuente: Imagen a: <https://www.bbc.com/mundo/noticias>. Imagen b: <http://www.misanplas.com.ar/>.

Las propiedades termofísicas más importantes de la sustancia estudiada se presentan en la Tabla 3.1, los valores allí consignados son los que se considerarán como punto de partida en el estudio del proceso de fusión llevado a cabo en esta Tesis.

Densidad ρ (kg/m ³)		Conductividad Térmica k (W/°C m)		Calor específico C (J/kg °C)	Calor latente de fusión L_F (J/kg)
líquido	sólido	líquido	sólido		
800	820	0,24	0,20	1600	120000

Tabla 3.1: Propiedades de la grasa vacuna.

Cabe aclarar que las propiedades consignadas en la Tabla 3.1, son tomadas de bibliografía para grasas animales. (Swern, 1964; West, 1983) Asimismo se consigna el valor del calor específico sin aclarar si se trata de sólido o líquido, hecho que no es significativo pues es el parámetro que menos influencia presenta en el avance del frente de fusión (Boucíguez, et al, 2003).

En esta línea y continuando con el estudio experimental se abordará en este capítulo 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 analizar estas variables, se la somete a ciclos de calentamiento - enfriamiento que involucran variaciones de temperatura en el rango de 20 a 70°C; hecho que permite registrar el comportamiento de las muestras tanto en estado sólido como líquido, ya que dicha sustancia presenta fusión alrededor de los 37°C.

La determinación de las propiedades térmicas de un PCM es fundamental en el proceso de transferencia de calor con cambio de fase. Si bien las mismas 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. Debido a los costos y disponibilidad debe recurrirse a sustancias comerciales, en este caso una grasa orgánica.

El conocimiento de las propiedades físicas relacionadas con el comportamiento térmico de una sustancia es importante para interpretar los perfiles térmicos de temperatura obtenidos en el proceso de fusión de dicho material, siendo además necesarios si se pretende realizar una simulación numérica de dicho comportamiento térmico como material de cambio de fase. En las siguientes secciones de este capítulo se abordará la determinación de algunas propiedades de la grasa vacuna.

3.2. Determinación de la densidad, la viscosidad y el Punto de fusión

3.2.1. Determinación de la densidad

La determinación de la densidad de la sustancia se realiza con un picnómetro Gay-Lussac, un recipiente formado por un matraz con forma de pera, de boca esmerilada y un tapón auto-enrasante. El método del picnómetro es muy preciso para la determinación de densidades, ya que puede llenarse con la sustancia y su volumen es conocido. Para determinar la densidad de un líquido con un picnómetro, solamente se necesita una balanza de precisión (miligramos) que permite conocer la masa del mismo en tres situaciones diferentes:

- Con el picnómetro vacío, se registra la masa del mismo (M_p).
- Con el picnómetro enrasado con el fluido de referencia (agua destilada), se registra su masa (M_{p+w}).
- Con el picnómetro enrasado con el líquido de densidad desconocida se registra su masa (M_{p+g}).

La densidad de la grasa se obtiene utilizando la siguiente expresión:

$$\rho_{grasa}(50^{\circ}C) = \left(\frac{M_{p+g} - M_p}{M_{p+w} - M_p} \right) \cdot \rho_{agua}(50^{\circ}C) \quad (3.1)$$

Esta ecuación nos permite hallar la densidad de la sustancia, simplemente sustituyendo en ella los tres datos de masa (M_p , M_{p+w} y M_{p+g}).

Las masas medidas son: $M_{p+w}(T=50^{\circ}C)=40,1501$ g, $M_{p+g}(T=50^{\circ}C)=37,6741$ g y $M_p=14,8894$ g. Se debe sustituir, también el dato de la densidad del agua destilada a la misma temperatura ($50^{\circ}C$) a la que se realiza la determinación de la densidad de la sustancia, $\rho_{agua}(T=50^{\circ}C)=988,02$ kg/m³. En este caso, el valor numérico de la densidad de la grasa orgánica a $50^{\circ}C$, resulta:

$$\rho_{exp} = (891,20 \pm 0,02) \frac{kg}{m^3} \quad (3.2)$$

La FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación) da la composición de carnes y otras fuentes de alimento; para la grasa bovina se tienen:

Agua (%)	Proteínas (%)	Lípidos (%)	Cenizas (%)
0,04	0,015	0,94	0,001

Tabla 3.2: Composición de la grasa vacuna según la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación)

La densidad de un alimento se puede determinar a partir de la composición del mismo, y de la densidad de cada componente. Así, la densidad es la suma del producto de la fracción de masa de cada componente (X_i) y la densidad del componente (ρ_i), según la ecuación:

$$\rho = \sum_i \rho_i \cdot X_i \quad (3.3)$$

Los autores Choi y Okos (1986) estudiaron el efecto de la variación de densidad con la temperatura para los distintos componentes de los alimentos. Obtuvieron correlaciones para los siguientes componentes: humedad, proteínas, lípidos, carbohidratos, fibras y cenizas, los que se muestran en la figura 3.2.

Tabla 01: Ecuaciones para estimar la densidad (Kg/m³) de los principales componentes de los alimentos en función de la temperatura , en el rango de – 40°C a 150°C.

<i>Componente</i>	<i>Función de la temperatura</i>
Carbohidratos	$\rho = 1599.1 - 0.3105T$
Fibra	$\rho = 1311.5 - 0.3659T$
Proteína	$\rho = 1330.0 - 0.518T$
Grasa	$\rho = 925.6 - 0.4176T$
Ceniza	$\rho = 2423.8 - 0.2806T$
Agua Líquida	$\rho = 997.2 + 3.1439 \times 10^{-3}T - 3.7574 \times 10^{-3}T^2$
Hielo	$\rho = 916.89 - 0.13071T$

Fuente: Choi y Okos. 1986. Effects of temperature and composition on the thermal properties of foods. In: ML Maguer, P Jelen, Eds., Food Engineering and Process Applications, Vol. 1, Transport Phenomena. New York.

Figura 3.2: Expresiones para la densidad de los componentes de los alimentos en función de la temperatura. (Choi y Okos, 1986)

Con los datos obtenidos de la composición de la grasa y las ecuaciones para las densidades de los componentes en una planilla Excel se calculó la densidad de la sustancia a diferentes temperaturas (Tabla 3.2).

TEMPERATURA (°C)	AGUA (kg/m³)	PROTEINA (kg/m³)	LIPIDOS (kg/m³)	CENIZAS (kg/m³)	GRASA (kg/m³)
0	997,20	1330,00	925,60	2423,80	932,33
10	996,85	1324,82	921,42	2420,99	928,31
20	995,76	1319,64	917,25	2418,19	924,26
30	993,91	1314,46	913,07	2415,38	920,18
40	991,31	1309,28	908,90	2412,58	916,07
50	987,96	1304,1	904,72	2409,77	911,93
60	983,86	1298,92	900,54	2406,96	907,76
70	979,01	1293,74	896,37	2404,16	903,56
80	973,40	1288,56	892,19	2401,35	899,33

Tabla 3.3: Densidad de la grasa orgánica y sus componentes en función de la temperatura.

De la Tabla 3.3 se puede establecer que la densidad de la sustancia a 50°C es de:

$$\rho_{teórico} \cong 911,93 \frac{kg}{m^3} \quad (3.4)$$

Se puede comparar este valor con el obtenido experimentalmente y se encuentra una variación relativa porcentual:

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} \times 100 \cong 2,3\% \quad (3.5)$$

Esta variación relativa está dentro de los errores experimentales corrientemente aceptados (5 %).

3.2.2. Determinación de la Viscosidad

La determinación de esta propiedad, se realiza empleando el método basado en la Ley de Stokes. Cuando un cuerpo sólido cae a través de un líquido, el efecto de la viscosidad se manifiesta en una resistencia a la caída de dicho cuerpo. En el instante en que la gravedad compensa la resistencia hacia arriba debida a la viscosidad, el cuerpo adquiere una velocidad constante llamada velocidad terminal.

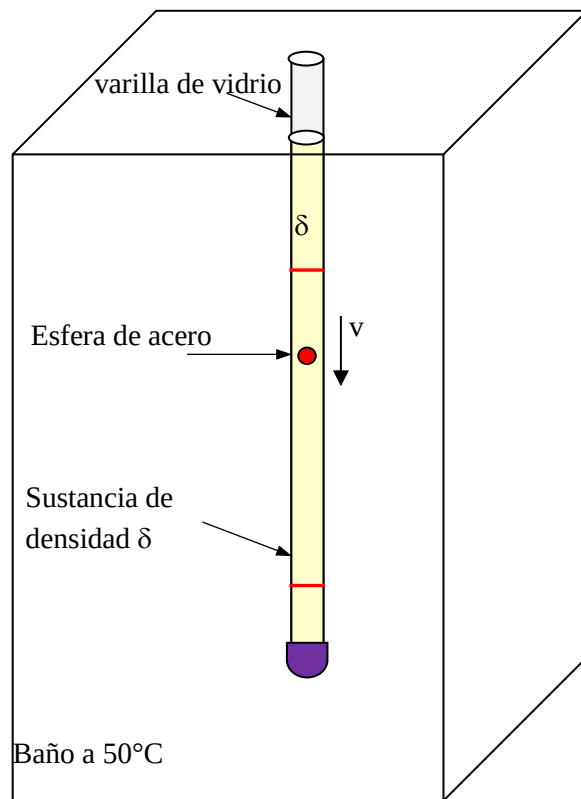
Para una esfera de radio r , la velocidad terminal v está relacionada con la viscosidad μ , por la Ley de Stokes (Alonso y Finn, 1986). Las fuerzas que actúan sobre la esfera que cae son: resistencia viscosa, empuje ascendente y peso de la esfera. De la relación mencionada puede establecerse que la velocidad terminal v (m/s) está dada por la siguiente expresión:

$$v = \frac{2 g r^2 (\rho_{esfera} - \rho_{fluido})}{9\mu} \quad (3.6)$$

Donde g es la aceleración de gravedad ($9,8 \text{ m/s}^2$), r es el radio de las esferas de acero (m) y ρ_{esfera} es la densidad de las mismas (kg/m^3), ρ_{fluido} es la densidad del líquido (kg/m^3) y μ su viscosidad (kg/ms).

El dispositivo utilizado para la medición consiste en:

- Baño termostático con visor de vidrio, a 50°C .
- Varilla de vidrio de 50 cm de longitud, diámetro interno: 0,5cm y diámetro externo: 0,6 cm.
- 7 esferas de acero de radio 0,1575 cm (volumen $0,0164 \text{ cm}^3$) y pesos comprendidos entre 0,1318 g y 0,1308 g, que da lugar a densidades entre $7,9756 \text{ g/cm}^3$ y $8,0366 \text{ g/cm}^3$.
- Cronómetro



a)



b)

Figura 3.3. Izquierda: Esquema de la experiencia. Derecha: foto de la varilla con la sustancia ensayada y esferas de acero empleadas.

En la figura 3.3 a) se muestra el esquema del dispositivo experimental empleado en la determinación de la viscosidad y la 3.3 b) una foto de la varilla que contiene el PCM en estado líquido y las esferas de acero utilizadas.

Se llena la varilla completamente con la grasa en estado líquido y se coloca en el baño termostático a 50 °C. La varilla tiene dos marcas, la primera a 12,5 cm del extremo superior y la segunda a 35 cm, dejando un recorrido medio de 22,5 cm (l) entre las dos marcas. Una vez estabilizada la temperatura, se deja caer la esfera por el extremo superior y se toma el tiempo (t) que tarda en recorrer la distancia l .

Se considera que la velocidad de caída, v , es constante, por lo tanto:

$$v = \frac{l}{t} \quad (3.7)$$

Reemplazando v en la ecuación 3.6 y despejando, la viscosidad del líquido está dada por la relación:

$$\mu = \frac{2 g r^2 (\rho_{esfera} - \rho_{fluido}) \cdot t}{9l} \quad (3.8)$$

En la experiencia se trabaja con siete esferas cuyos tiempos de caída se muestran en la primera columna de la tabla 3.4.

Se debe aclarar que, para realizar este cálculo, previamente se debe determinar la densidad de la grasa, a 50 °C.

Tiempo (s)	$\mu_{grasa}(\text{kg/m s})$
2,64	0,0053
2,78	0,0056
2,54	0,0051
2,52	0,0051
2,56	0,0052
2,66	0,0054
2,72	0,0055

Tabla 3.4: Valores de viscosidad obtenidos en laboratorio.

Haciendo un análisis sencillo del error estadístico, la viscosidad obtenida se puede expresar como:

$$\mu_{grasa}(50^{\circ}\text{C}) = (0,0053 \pm 0,0002) \frac{\text{kg}}{\text{m.s}} \quad (3.9)$$

En el sistema internacional las unidades de la viscosidad, es el pascal-segundo (Pa.s) que corresponde a 1 Kg/ms o a 1 Ns/m². Una unidad muy conocida históricamente y la que se referencia en la bibliografía es el Poise (P) equivalente a 0,1 Pa.s. Una referencia útil es que la viscosidad del agua a 20 °C es 1 Poise, de allí la conveniencia de expresar la viscosidad en estas unidades. Para el caso de la grasa orgánica se tiene:

$$\mu_{grasa}(50^{\circ}C) = (0,053 \pm 0,002)P \quad (3.10)$$

No se encuentra, en la bibliografía consultada, valores de viscosidad para sustancias orgánicas, como la grasa estudiada en este trabajo. Sin embargo, en el trabajo presentado por Rodríguez Martínez (Rodríguez Martínez et al., 2012) se determina el valor de viscosidad para un aceite: $\mu(40^{\circ}C) \approx 0,03 P$, por lo que el valor obtenido se aproxima al mismo.

3.2.3. Determinación del punto de fusión.

La determinación del punto de fusión de la grasa orgánica estudiada se realiza con la técnica de Calorimetría diferencial de barrido con modulación en temperatura (MDSC). En esta técnica, la muestra y el material de referencia están sujetos a un cambio de temperatura programado con precisión. Cuando ocurre una transición térmica en la muestra (un cambio físico o químico, que da lugar a una emisión o absorción de calor), se adiciona energía térmica, bien sea a la muestra ó a la referencia con el objeto de mantener ambas a la misma temperatura. Debido a que la energía transferida es exactamente equivalente, en magnitud, a la absorbida o producida en la transición, el balance de energía proporciona una medición calorimétrica directa de la energía de transición. El flujo diferencial de calor hacia la muestra y a la referencia, se monitorean mediante termopares; esta técnica permite obtener termogramas que señalan la temperatura en que se produce la transición y el área bajo la curva MDSC proporciona una medida directa del cambio de entalpia ΔH para la transición.

Para el caso de la grasa orgánica, utilizando una muestra de 9 mg, con la técnica mencionada se obtiene el resultado mostrado en la Figura 3.4 que muestra el valor de temperatura para el cual ocurre el cambio de fase.

$$T_F = (32,19 \pm 0,01)^{\circ}C \quad (3.11)$$

Esta sustancia fue ensayada en el laboratorio, a fin de analizar diversos aspectos del proceso de fusión de dicha sustancia, por lo que se cuenta con la evolución temporal de temperatura de la sustancia, en etapa de calentamiento y enfriamiento.

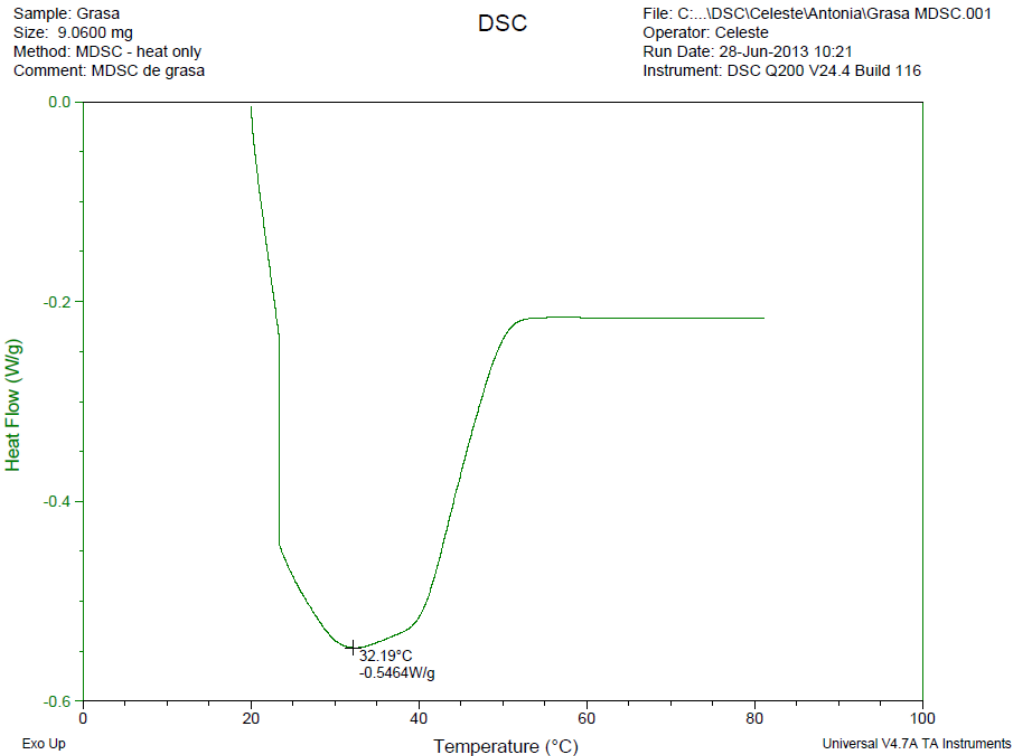


Figura 3.4: Calorimetría diferencial de barrido con modulación para una grasa orgánica.

3.3. Fenómeno de Sub-enfriamiento

En el trabajo Vilte y Esteban (2014), se discute el fenómeno de sub-enfriamiento que presenta esta sustancia al solidificarse. En la Figura 3.5 se grafican los valores de temperaturas de la sustancia contenida en una cavidad rectangular ($25 \times 18 \times 6 \text{ cm}^3$), calentada desde una pared lateral. En esta gráfica puede observarse el fenómeno de sub-enfriamiento que permite determinar en forma aproximada el punto de solidificación de la sustancia. En este caso: $31,5^\circ\text{C} < T_{\text{Sol}} < 33^\circ\text{C}$, presentando pequeñas variaciones dependiendo de la posición del sensor (T ($x=5 \text{ cm}$, y , $z=6 \text{ cm}$)) dentro de la sustancia. También se observa que el proceso de solidificación comienza desde la parte inferior del recinto.

De la comparación del fenómeno de sub-enfriamiento, para diferentes ensayos, se advierte que dicho punto de solidificación también sufre leves cambios, con los ciclos de calentamiento-enfriamiento a los cuales es sometida la sustancia. A pesar de las variaciones encontradas, el punto de solidificación se mantiene cercano al punto de fusión determinado por el método MDSC.

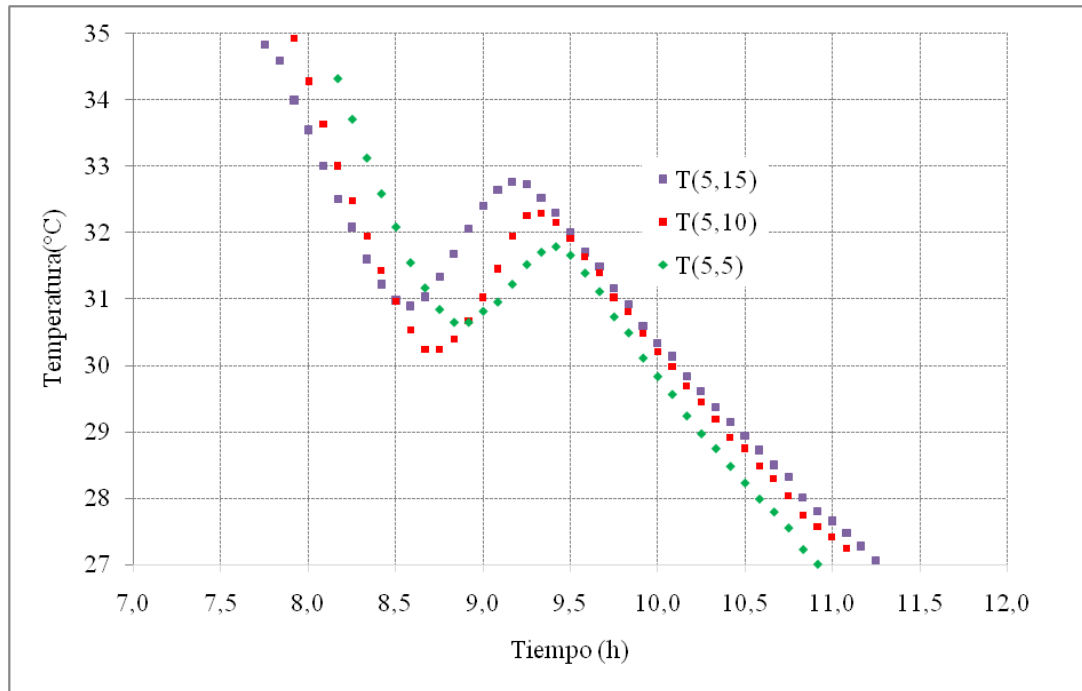


Figura 3.5: Evolución temporal de temperaturas a diferentes alturas (y) en la cavidad ($x=5\text{cm}$).

3.4. Determinación de la Conductividad y difusividad térmica. Estimación de la Capacidad Calorífica.

En esta sección se presenta un método de solución de problema inverso de conducción de calor para estimar la conductividad (k) y la difusividad térmica (α), de una muestra de grasa orgánica en estado sólido, a partir de mediciones de temperatura. El método consiste en la minimización de la suma de cuadrados de las diferencias entre las temperaturas medidas y estimadas (solución del problema directo con valores de parámetros, iniciales dados y luego calculados en el proceso iterativo).

3.4.1. Formulación del problema

3.4.1.1. Problema directo

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

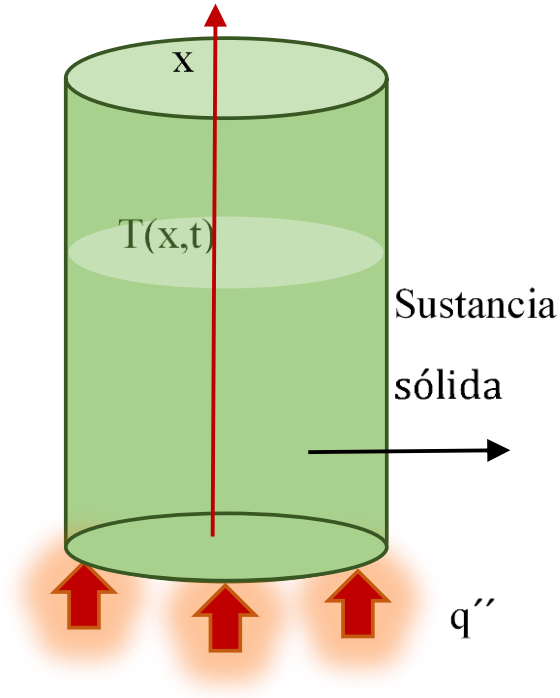


Figura 3.6: Esquema del Problema planteado.

El problema resulta descrito por las ecuaciones 3.12 a 3.14, (Bejan A., 1993), cuya incógnita es el campo de temperatura $T(x, t)$ en el sólido.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad t > 0, \quad x > 0 \quad (3.12)$$

$$T(x, 0) = T_0 \quad x > 0 \quad (3.13)$$

$$q'' = -k \frac{\partial T}{\partial x}(0, t) \quad t > 0 \quad (3.14)$$

La ecuación (3.12) es la de difusión en el sólido, la (3.13) es la condición inicial y la (3.14) es la condición de borde. La solución está dada por:

$$T(x, t) = T_0 + 2 \frac{q''}{k} \left(\frac{\alpha t}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{x^2}{4\alpha t}\right) - \frac{q''}{k} \operatorname{erfc}\left[\frac{x}{2(\alpha t)^{1/2}}\right] \quad (3.15)$$

3.4.1.2. Problema inverso

Se considera un problema similar al dado por las ecuaciones (3.12), (3.13) y (3.14) 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. 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 $M = 5$.

La temperatura T se mide en $^{\circ}\text{C}$; la posición x en metros (m); el tiempo en segundos (s); el flujo de calor q'' , en W/m^2 ; la difusividad térmica α en m^2/s ; la conductividad térmica k en $\text{W}/\text{m } ^{\circ}\text{C}$.

3.4.2. Modelo de cálculo

3.4.2.1. Algoritmo computacional

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

$$S(k, \alpha) = \sum_{m=1}^5 \sum_{i=1}^{16} [Y_{im} - T_{im}(k, \alpha)]^2 \quad (3.16)$$

Y requiere el cálculo de la matriz de sensibilidad J cuyos elementos se conocen como los coeficientes de sensibilidad, definidos por:

$$J_{rj} = \frac{\partial T_k}{\partial P_j} \quad r = 1, \dots, (I - 1)M + m \quad j = 1, \dots, N \quad (3.17)$$

Donde P_j denota un parámetro desconocido y N es el número de parámetros. En este caso $N = 2$, $P_1 = k$ y $P_2 = \alpha$. Los subíndices r y j se refieren al número de filas y número de columnas de la matriz de sensibilidad respectivamente. El número de filas r está relacionado con la medida temporal t_i y al sensor m por la expresión, $r = (i-1)M + m$. 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 $(J^T J)$ 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 ($k=0,6 \text{ W}/\text{m } ^{\circ}\text{C}$, $q''=400 \text{ W}/\text{m}^2$, $\alpha=5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$), como se muestra en la Tabla 3.5. 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 $r=3$ y menores los correspondientes a q'' (orden -1), columna $r=2$, como se muestra en la tabla 3.6 para los valores de $k = 1 \text{ W}/\text{m } ^{\circ}\text{C}$, $\alpha = 5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ y $q'' = 400 \text{ W}/\text{m}^2$.

Iteración	k (W/ m °C)	q'' (W/m ²)	α (m ² /s)
10	0,6	400,00	1/500000
20	0,59999	400,00	1,355×10 ⁻⁷
30	0,48074	400,00	1,005×10 ⁻⁷
40	0,48074	400,00	1,005×10 ⁻⁷
50	0,48074	400,00	1,005×10 ⁻⁷
60	0,48074	400,00	1,005×10 ⁻⁷
70	0,48074	400,00	1,005×10 ⁻⁷
80	0,48074	400,00	1,005×10 ⁻⁷
90	0,48074	400,00	1,005×10 ⁻⁷
100	0,48074	400,00	1,005×10 ⁻⁷

Tabla 3.5: Valores de parámetros térmicos y densidad de flujo de calor.

i \ r	r =1	r =2	r =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

Tabla 3.6: Valores de los coeficientes de la matriz de sensibilidad.

En ese sentido se tuvo 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:

$$\mathbf{P}^{r+1} = \mathbf{P}^r - \beta^r \mathbf{d}^r \quad (3.18)$$

Donde $P = (P_1, P_2)$, β^r se denomina tamaño de paso de búsqueda, d^r es la dirección de descenso y el subíndice r es el número de iteraciones. Se parte de una conjetura inicial P_0 para los parámetros incógnitas. La dirección de descenso está dada por:

$$d^r = \nabla S(P^r) - \gamma^r d^{r-1} \quad (3.19)$$

La dirección de gradiente está dada por:

$$[\nabla S(P^r)]_j = \frac{\partial S}{\partial P_j} \quad (3.20)$$

El coeficiente de conjugación se define como:

$$\gamma^r = \frac{\sum_{j=1}^N \{[\nabla S(\bar{P}^r) - \nabla S(\bar{P}^{r-1})]_j\}}{\sum_{j=1}^N [\nabla S(\bar{P}^r)]^2} \quad r = 1, 2, \dots \quad (3.21)$$

Con $\gamma^0 = 0$ para $r = 0$

El tamaño de paso de búsqueda está dado por:

$$\beta^r = \frac{\sum_{i=1}^I \left[\left(\frac{\partial T_i}{\partial P^r} \right)^T d^r \right] [T_i(P^r) - Y_i]}{\sum_{i=1}^I \left[\left(\frac{\partial T_i}{\partial P^r} \right)^T d^r \right]^2} \quad (3.22)$$

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

3.4.2.2. Comprobación del algoritmo y de su implementación

Para comprobar el algoritmo, se supuso que una sustancia sólida de conductividad, $k = 0,6$ W/m °C y difusividad, $\alpha = 1 \times 10^{-7}$ m²/s con temperatura inicial $T_0 = 19^\circ\text{C}$, es sometida a un flujo de calor constante $q'' = 500$ W/m² en el borde. A partir de la solución (ecuación 3.15) del problema directo (ecuaciones 3.12 a 3.14) se generaron 100 valores de 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: $k = 1$ W/m °C y $\alpha = 2 \times 10^{-6}$ m²/s. Luego de 20 iteraciones las estimaciones para k y α , resultaron $0,600923$ W/m °C y $1,00491 \times 10^{-7}$ m²/s 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:

$$\mathbf{P} = (\mathbf{J}^T \mathbf{J})^{-1} \mathbf{J}^T \quad (3.23)$$

Para el caso de la grasa con $q'' = 500 \text{ W/m}^2$, con valores dados de $k = 0,5 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ y $\alpha = 9,4 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$, se ejecutó este programa con valores iniciales para q'' de 400 W/m^2 y 600 W/m^2 y se obtuvo una estimación para el flujo de calor de $498,94 \text{ W/m}^2$ y $498,95 \text{ W/m}^2$ respectivamente.

3.4.3. Ensayo Experimental

3.4.3.1. Medición de las temperaturas

El contenedor de la sustancia es un cilindro de vidrio de $0,001 \text{ m}$ de espesor y diámetro interno $D = 0,048 \text{ m}$. En la base del recipiente se adosó una placa de aluminio de $0,001 \text{ m}$ 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 . Cabe aclarar que, efectivamente ingresa al sistema aproximadamente 1 W de potencia, ya que el devanado del calefactor involucra ambas superficies del mismo y solo una se encuentra en contacto con el cilindro. 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 $0,0003 \text{ m}$ de diámetro y recubiertas con cinta de teflón, las cuales previo a los ensayos se calibran en el rango, de 15 a 70°C .

Los sensores registran temperaturas cada 2 min . El sensor ubicado en la superficie interna de la base del recipiente mide la temperatura T_{in} y se adhiere al mismo antes de realizar el llenado con la sustancia. La sustancia se introduce en estado líquido y alcanza una altura L ($0,18 \text{ m}$). El recipiente se cierra con una tapa de goma previamente perforada para introducir 4 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 ubicado entre la placa calefactora y la base del recipiente mide la temperatura T_C . Se registra también la temperatura ambiente T_0 .

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 3.6 se muestra un esquema de una parte del dispositivo experimental utilizado y las posiciones de las termocuplas.

El tiempo del ensayo está limitado por la condición de que la temperatura en el borde de la sustancia sea menor que la temperatura de fusión, para que no se inicie el proceso convectivo que ocurre con la sustancia en estado líquido.

La sustancia orgánica ensayada es grasa vacuna, algunas de sus propiedades termofísicas fueron evaluadas en la sección anterior de este capítulo.

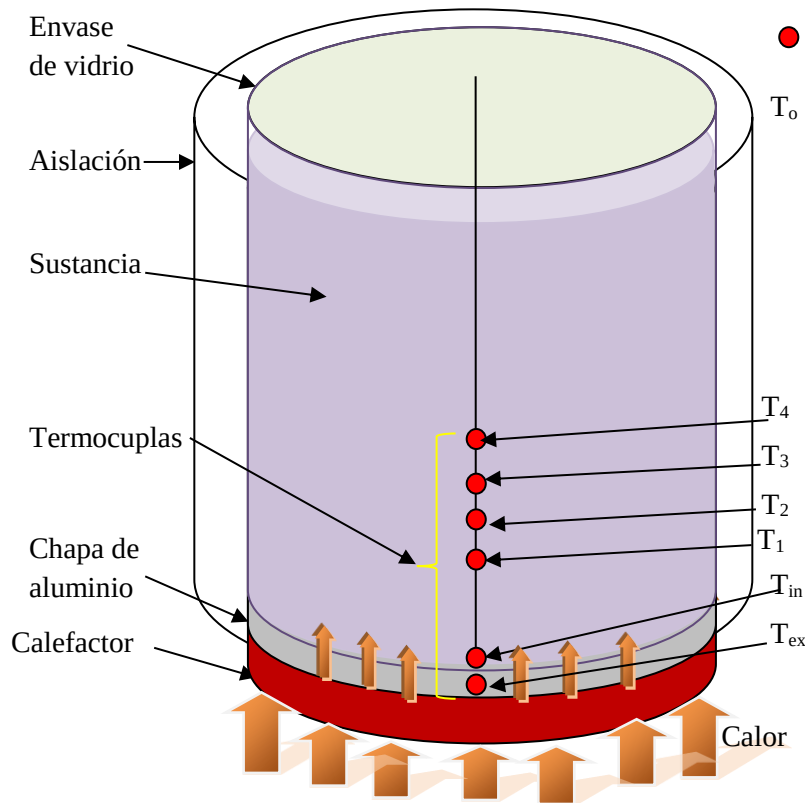


Figura 3.7: Contenedor con la muestra de grasa, disposición de los sensores.

3.4.3.2. Medición del flujo de calor

Con el mismo dispositivo que se esquematiza en la figura 3.6 y en idénticas condiciones se calentó una masa de 0,300 kg de agua durante un tiempo conocido para determinar la densidad de flujo de calor en el borde. Se calculó la transferencia de calor a la masa de agua con la expresión $Q = m C_p (T_f - T_i)$, donde $C_p = 4186 \text{ J/kg } ^\circ\text{C}$, es el calor específico del agua. Luego de dividir por el tiempo y el área ($A = 0,0018 \text{ m}^2$) se obtiene la densidad de flujo de calor q'' .

T_i ($^\circ\text{C}$)	T_f ($^\circ\text{C}$)	Tiempo de calentamiento	Q (J)	q'' (W/m^2)
23,1	25,8	63 minutos	3385,8	495
25,5	28,2	60 minutos	3385,8	520

Tabla 3.7: Valores determinados de flujo y densidad del flujo de calor.

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

3.4.4. Resultados Obtenidos

El procedimiento iterativo se implementó en un programa en lenguaje Wolfram Mathematica 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: $k^0 = 0,8 \text{ W/ m } ^\circ\text{C}$, $\alpha^0 = 5 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ y $q'' = 500 \text{ W/m}^2$ luego de 100 iteraciones se obtiene:

$$k_s = (0,50 \pm 0,01) \text{ W/m}^\circ\text{C} \quad (3.24)$$

$$\alpha_s = (9,4 \pm 0,1) \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s} \quad (3.25)$$

En la tabla 3.8 se observa que a partir de la iteración 20 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 .

Iteración	k (W/ m °C)	α (m ² /s)
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	$9,43287 \times 10^{-8}$

Tabla 3.8: Valores estimados de conductividad y difusividad térmicas.

En la siguiente tabla se muestra que para otras conjeturas iniciales se obtienen los mismos valores de k y α .

Iteración	k^0 (W/ m °C)	α^0 (m ² /s)	k (W/ m °C)	α (m ² /s)
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 3.9: Valores estimados de conductividad y difusividad térmicas para diferentes valores de conjetura inicial.

Con los valores de k y α obtenidos en esta Tesis y el valor de la densidad $\rho = 922 \text{ kg/m}^3$ a 25°C , se calcula el calor específico (C) en el rango de temperaturas entre 20 y 40°C , obteniéndose un valor de $5,8 \times 10^3 \text{ J/kg } ^\circ\text{C}$.

Por otra parte, se determina la conductividad térmica y la capacidad calorífica de la grasa vacuna empleando las correlaciones obtenidas por Choi y Okos en 1987 función de la temperatura para los componentes de humedad, proteínas, lípidos, carbohidratos, fibras y cenizas de la grasa vacuna. La composición centesimal de la grasa se obtiene a partir del trabajo (Ochoa O. et al, 2006). Los valores de conductividad térmica y capacidad calorífica obtenidos son los que a continuación se detallan:

$$k = (0,20 \pm 0,01) \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

$$C = (2380 \pm 1) \text{ J/}^\circ\text{C kg}$$

En esta Tesis se supuso que la conductividad y la difusividad térmicas no dependen de la temperatura por lo que los valores obtenidos pueden considerarse un promedio en el rango de temperatura estudiado.

3.5. Consideraciones sobre los números adimensionales que caracterizan el proceso de fusión

De la consulta bibliográfica sobre el proceso de fusión de una sustancia de cambio de fase, se desprende que tanto en el abordaje experimental como numérico es importante conocer algunos números adimensionales que surgen del análisis de las ecuaciones. Estos números en algunos casos como el Stefan (Ste) caracteriza la energía que la sustancia puede liberar o absorber en el proceso de cambio de fase. El número de Prantl (Pr) permite en algún caso simplificar las ecuaciones de Navier Stokes y se define como el cociente entre la velocidad de difusión de la cantidad de momento (viscosidad ν) y la difusividad térmica (α):

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha}$$

La viscosidad cinemática y la viscosidad dinámica están relacionadas por:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

En el caso de la sustancia estudiada, grasa vacuna, el valor calculado de ν es de $5,94 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ y de $\alpha = 9,4 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$, por lo que:

$$Pr \sim 62 \gg 1$$

El número de Ste se define como el cociente:

$$Ste = \frac{C_L \Delta T^L}{L_F}$$

En el caso de la sustancia orgánica estudiada, el valor de la capacidad calorífica (C_S) estimado en la sección anterior (para $20^\circ\text{C} < T < 40^\circ\text{C}$) se considera igual al valor de C_L . El calor latente de la sustancia se toma del trabajo (Razali et al, 2019). De manera que, el valor del número de Stefan calculado en las etapas de transición a la convección y convección pura varía entre:

$$0,4 \leq Ste \leq 0,8$$

3.6. Conclusiones

Se mide la densidad de una grasa a 50°C . Si bien esta medida se requiere previamente a la determinación de la viscosidad de la sustancia, puede repetirse para otros valores de temperatura a fin de obtener una tabla o aproximar alguna expresión para la sustancia en estado líquido, en función de la temperatura.

Las medidas de viscosidad en el caso de las sustancias alimenticias, se realizan para el control de calidad de las mismas, las medidas llevadas a cabo en esta Tesis se realizan en vistas de mejorar la caracterización de la sustancia; para simular el complejo proceso de fusión que involucra fenómenos conductivos y convectivos.

En cuanto al punto de fusión, el estudio con la técnica de MDSC, proporciona un valor de temperatura de fusión. El valor de la temperatura de solidificación para la sustancia estudiada se encuentra cercano al punto de fusión, lo que explica que no se trata de una sustancia pura.

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 obtenidos de conductividad y difusividad térmicas 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 problemas de conducción de calor inverso, se pretende avanzar en la determinación de la conductividad y difusividad como funciones de la temperatura.

3.7. Bibliografía

1. Alonso M., Finn, E. J. (1986). Física Vol. I: Mecánica, Fondo Educativo Interamericano, México.
2. Bejan, A., Heat Transfer, John Wiley & Sons, Inc. 1993
3. Boucíguez, A Villa, L y Lara, M. (2003) Thermal Conditioning Using Phase Change Materials. Revista Engenharia Térmica (RETERM). ABCM. N° 3, 2003, pág. 71 - 74.
4. Carne y Productos cárnicos. Composición de la carne. http://www.fao.org/ag/againfo/themes/es/meat/backgr_composition.html (abril de 2017).
5. 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.
6. http://www.anmat.gov.ar/alimentos/normativas_alimentos_caa.asp
7. Ochoa, O.; Amezcua, 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.
8. Ozisik, M. N., and Orlande, H. R. B., Inverse Heat Transfer, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2000.
9. Razali T., Muhammad A. and Hamdani U. 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, November 2019
10. Rodríguez Martínez C., Lafargue Pérez F., Sotolongo Pérez J. Á., Rodríguez Poveda A., Chitue de Assuncao Nascimento J. (2012). Determinación de las propiedades físicas y carga crítica del aceite Vegetal *Jatropha curcas*. Ingeniería Mecánica. Vol. 15. No. 3, p. 170-175. ISSN 1815-5944.
11. Swern, D. (1964) Physical Properties of Fats and Fatty Acids. Cap. 3 Bailey's Industrial Oil and Fat Products.
12. Vilte M. 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.
13. West, C. (1983) International Critical Tables of Numerical Data. Physics, Chemistry and Technology. Editorial McGraw-Hill Book Company.

Capítulo 4:

4. Comportamiento térmico y visualización del problema. Parte I

4.1. Aspectos del abordaje experimental

De los recipientes: en todos los casos las sustancias fueron envasadas en recipientes de vidrio, contruidos especialmente o característicos de uso químico. Se contruyeron prismas rectangulares, en vidrio float de 3mm de espesor con tapas de acrílico del mismo espesor de las paredes. El techo de los recintos es de acrílico el que previamente se ha perforado para introducir en el interior de cada cavidad pares termoeléctricos que permiten el registro de las temperaturas en su interior. Una vez contruidos los recintos, se llenan con la sustancia en el estado líquido y se adhiere la tapa que incorpora los sensores de temperatura en su interior. Cuando el material se ha solidificado se procede a realizar las experiencias de calentamiento y enfriamiento. En el caso de aquellos propios de laboratorios de química se utilizaron de base circular, tales como cápsulas de Petrie de diferentes tamaños, vasos de precipitado, pesa filtros, cristalizadores, los que por su geometría y mejor calidad del vidrio facilitaron la visualización del comportamiento de las sustancias de cambio de fase.

Del sistema de calentamiento: las muestras con las sustancias ensayadas fueron calentadas eléctricamente por contacto con una resistencia contruida, en forma particular, para cada recinto ensayado. Dicha resistencia eléctrica es conectada a una fuente de tensión regulada. Esta configuración suministra un flujo de calor constante. En el anexo 3 se brindan detalles de los aspectos constructivos del calefactor empleado en los ensayos. Por otro lado, las muestras pueden recibir energía térmica por inmersión en un baño térmico a temperatura controlada. La etapa de calentamiento que implica la fusión de la muestra, es seguida por una etapa de enfriamiento. Las muestras fueron enfriadas por inmersión en agua fría o por simple contacto con el ambiente del laboratorio.

De las condiciones iniciales: para observar el proceso de fusión de la sustancia y paralelamente la evolución de la interface sólido – líquido, se realizan los ensayos con el material de cambio de fase inicialmente en estado sólido a temperatura ambiente o de laboratorio (~15 °C).

De las medidas térmicas: en las experiencias preliminares se usaron termómetros, luego termocuplas tipo T que consisten en un devanado de cobre y de constantan de 0,3 mm de diámetro, aisladas con una envoltura de teflón y la soldadura con aislante eléctrico de acrílico. Dichos sensores, se preparan para cada una de las experiencias y previo a los ensayos se calibran empleando un baño térmico de aire y un termómetro patrón. El registro de las medidas

térmicas se realiza con los pares termoelectricos ensamblados en módulos ADAM alimentados por una fuente de 12 V, que conectados a una PC permiten guardar y realizar el procesamiento posterior de las medidas térmicas obtenidas durante el proceso de calentamiento y enfriamiento en cada una de las experiencias.

De los registros fotográficos: se toman fotografías con una cámara digital en distintas etapas del proceso a fin de observar el avance del frente de fusión y poder apreciar el comportamiento de la sustancia. En el desarrollo de las experiencias, para determinar la fracción de sustancia líquida se procesan las fotos mejorándolas, por ejemplo, en brillo y contraste. Se emplea el programa ImageJ para calcular la fracción líquida como cociente de áreas, etc. Finalmente se automatizan la toma y el guardado de los registros usando una PC.

En el abordaje experimental, se trabaja con recintos de altura H , ancho L y profundidad W . En el antecedente experimental y en los casos 1 y 2, próximas secciones de este capítulo, se analiza la influencia del espesor del recinto en el proceso de convección natural que se establece en la fase líquida. Los sensores de temperatura para cada recinto se indican con la notación $T_i(x, y)$, donde la letra “ i ”, identifica el espesor o ancho de la muestra, es decir $i=2$, corresponde al recinto 2 de 2 cm de espesor, $i=3$ a 3 cm, etc., mientras que los números entre paréntesis dan la posición (x,y) medidas desde la pared calentada y desde la base (pared inferior), respectivamente; de modo que, por ejemplo, $T_2(1,0.5)$ representa a la temperatura del recinto 2 de 2 cm de espesor a 1 cm de la pared que recibe calor y 0.5 cm de la base. Las temperaturas en el centro de la pared interna y externa se designan con T_{in} y T_{ex} . En la sección 2 del capítulo 5 se estudia la influencia de la altura en el desarrollo del proceso de convección natural y sus consecuencias en la evolución de la forma y velocidad del frente de fusión. En las tablas 4.1, 4.2, 4.3, 5.1 y 5.3 se proporciona información sobre modelos ensayados y la ubicación de los sensores de temperatura, nomenclatura que se empleará en lo que resta de los capítulos.

4.2. Antecedente Experimental

Se aborda el estudio experimental a escala de laboratorio de una grasa orgánica vacuna a fin de evaluar la importancia del efecto de la convección natural, en la forma y el movimiento del frente de fusión en cavidades rectangulares de diferentes espesores que contienen el material de cambio de fase. Dichos recintos están en contacto en forma simultánea con un calefactor que proporciona un flujo calor constante en una pared lateral en la dirección normal al espesor. Se analiza y compara el perfil de temperaturas obtenido en el interior, cuando los mismos están en contacto con el ambiente y cuando se aísla el sistema completo.

Se observa el proceso de fusión y solidificación en dos cavidades rectangulares de diferentes espesores cuando son calentadas desde una superficie lateral. Las dimensiones del modelo 1 y 2 son las que se indican en la tabla 4.1, la relación en el espesor de ambos modelos es 1:10.

Modelo	Espesor (cm)	Dimensión (cm ³)	Volumen (m ³)	Temperaturas en el interior sustancia Ti(x,y)	Sensores pared calentada
1	1	(1x12x18)	0,00216	T1(0.5, 0.5), T4(0.5,9), T4(0.5, 17.5)	T1 _{in} , T1 _{ex}
2	10	(10x12x18)	0,0216	T2(0.5, 0.5), T2(0.5,9) T2(0.5, 17.5), T2(1.5, 0.5) T2(1.5, 9), T2(1.5, 17.5)	T2 _{in} , T2 _{ex}
Potencia aplicada (W)				12	

Tabla 4.1: Información de los modelos 1 y 2 ensayados.

El proceso de calentamiento se realiza empleando una resistencia calefactora de 26 Ω , construida sobre una base de fibra de vidrio de 12x18 cm² de superficie donde se devana un hilo de constantan entre ambas caras, por lo que el calefactor transfiere un flujo de calor de calor prácticamente igual por cada una de ellas. Dicho calefactor se ubica entre los dos recintos con grasa, colocándose entre el calefactor y cada recinto una chapa de aluminio de igual superficie para optimizar el contacto y uniformizar el flujo de calor transferido. La potencia de calentamiento es suministrada por una fuente doble regulable de 30V y 3 A, que fija una salida estable de potencia.

En la Figura 4.1 (parte izquierda) se muestra el dispositivo experimental para la realización de las experiencias: los recintos con grasa, los sensores de temperatura, las fuentes de alimentación y la resistencia calefactora, etc. En la parte derecha puede apreciarse la relación entre los espesores de los dos recintos que contienen el material de cambio de fase.

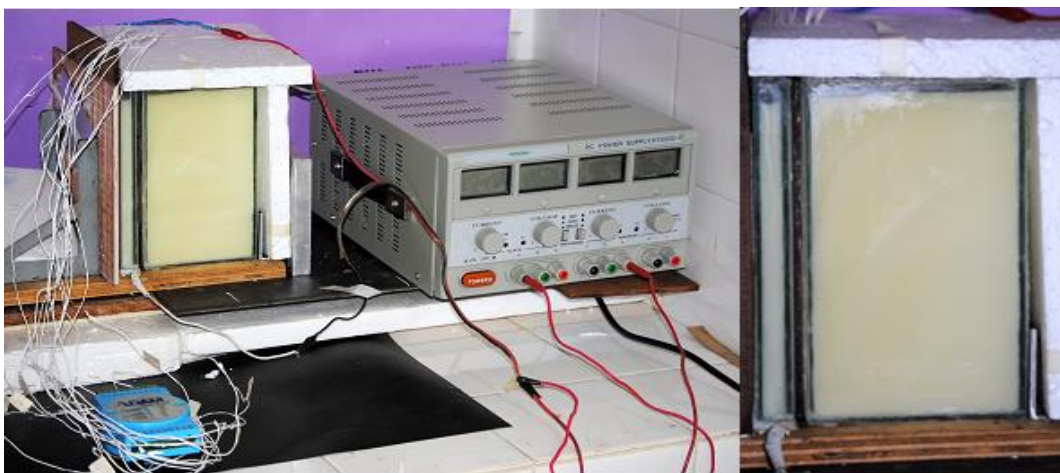


Figura 4.1: Izquierda: Dispositivo experimental que se emplea en los ensayos. Derecha: Recintos, calefactor y aislación.

Se observa el avance del frente de fusión y la presencia de efectos convectivos que pueden modificar el desarrollo del mismo. Para el recinto de 1 cm de espesor, los efectos convectivos son despreciables, en el caso de mayores espesores, tal como el de 10 cm, los efectos convectivos son importantes. El frente de fusión deja de ser una capa de espesor homogéneo y constante próxima a la pared caliente y se torna de un mayor espesor en la zona superior cercana a la parte superior del recinto (Vilte y Bouciguez, 2010).

En este aspecto, se plantea el estudio exhaustivo de la influencia del espesor en el desarrollo de la transferencia de calor por convección en el proceso de fusión del material de cambio de fase.

Por otro lado, el proceso de fusión en un recinto rectangular con calentamiento lateral fue estudiado desde el punto de vista experimental, y numérico (Benard et al, 1985), (Zhang y Bejan, 1989), para diferentes sustancias de cambio de fase como metales o sustancias orgánicas como el octadecano y para diferentes condiciones de borde. (Hamdam y Al-Inti, 2004) proponen una solución analítica para el avance de la frontera y la fracción de líquido presente, que será discutida en la sección 2 del capítulo 5 para la sustancia aquí estudiada.

4.3. Variación del espesor

4.3.1. Caso 1: Modelos 2, 3, 4 y 5

En estas experiencias se pretende:

- Examinar el avance del frente de fusión y el efecto de la convección natural que podría aparecer en el líquido emergente.
- Analizar y comparar los perfiles de temperaturas y su evolución en relación a las características del proceso de fusión

4.3.1.1. Dispositivo Experimental

En la Figura 4.2 se muestra el dispositivo experimental empleado en las experiencias. En la Tabla 4.2 se proporciona información sobre los recintos ensayados. En la Figura 4.3 se indica la ubicación de los sensores de temperatura en cada recinto. Aprovechando que el devanado del calefactor está por ambos lados del mismo, se ubica entre dos recintos; así los ensayos de calentamiento y enfriamiento en los cuatro recintos de diferente espesor se han realizado en forma simultánea, primero los modelos 3 y 5; luego los modelos 2 y 4.

Los recintos son aislados térmicamente del ambiente adosando a las paredes externas poliestireno expandido de 2 cm de espesor. La temperatura ambiente del laboratorio (T_0) varía entre 15 y 18°C. La etapa de calentamiento del sistema se prolonga por un período de tiempo entre seis y ocho horas, luego el sistema se enfrió en contacto con el ambiente hasta que la sustancia se solidificó completamente.



Figura 4.2: Dispositivo experimental: fuente, sensores de temperatura, registro de datos, recinto y aislación.

Modelo	Espesor (cm)	Dimensión cm^3	Volumen (m^3)	Sensores en el interior de la sustancia $T_i(x,y)$	Sensores en la pared calentada
2	2	(2x12x18)	0,00043	T2(1, 0.5), T2(1,9) T2(1, 17.5), T2(2, 0.5) T2(2, 9), T2(2, 17.5)	T2 _{in} , T2 _{ex}
4	4	(4x12x18)	0,00086	T4(1, 0.5), T4(1,9) T4(1, 17.5) T4(2, 0.5) T4(2, 9), T4(2, 17.5)	T4 _{in} , T4 _{ex}
3	3	(3x12x18)	0,00065	T3(1, 0.5), T3(1,9) T3(3, 17.5), T3(2, 0.5) T3(2, 9), T3(2, 17.5)	T3 _{in} , T3 _{ex}
5	5	(5x12x18)	0,0011	T5(1, 0.5), T5(1,9) T5(1, 17.5), T5(2, 0.5) T5(2, 9), T5(2, 17.5)	T5 _{in} , T5 _{ex}
Potencia aplicada (W)			7.7		

Tabla 4.2: Información de los modelos ensayados en el caso 1.

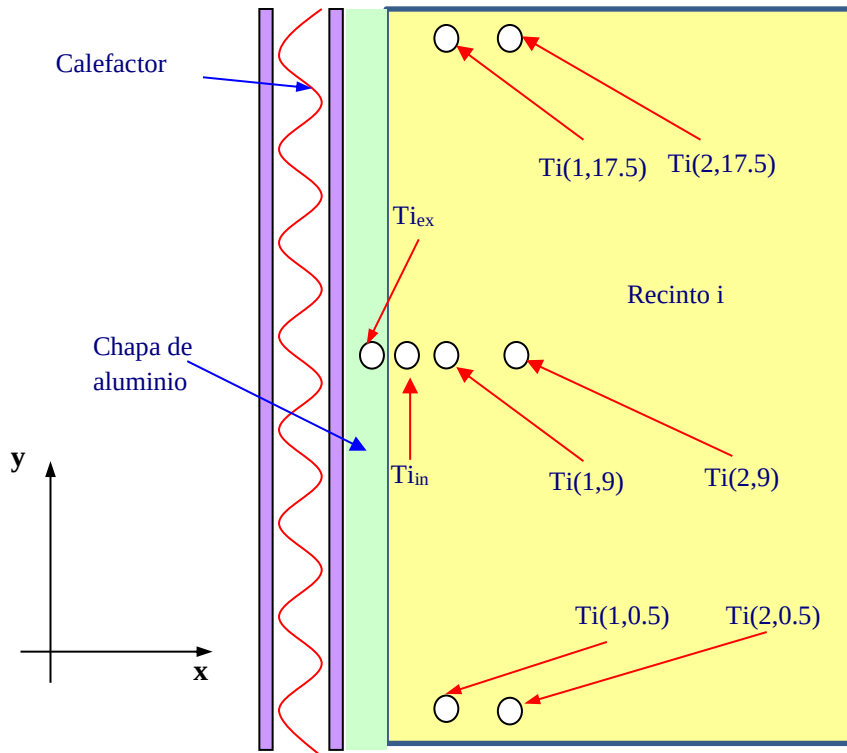
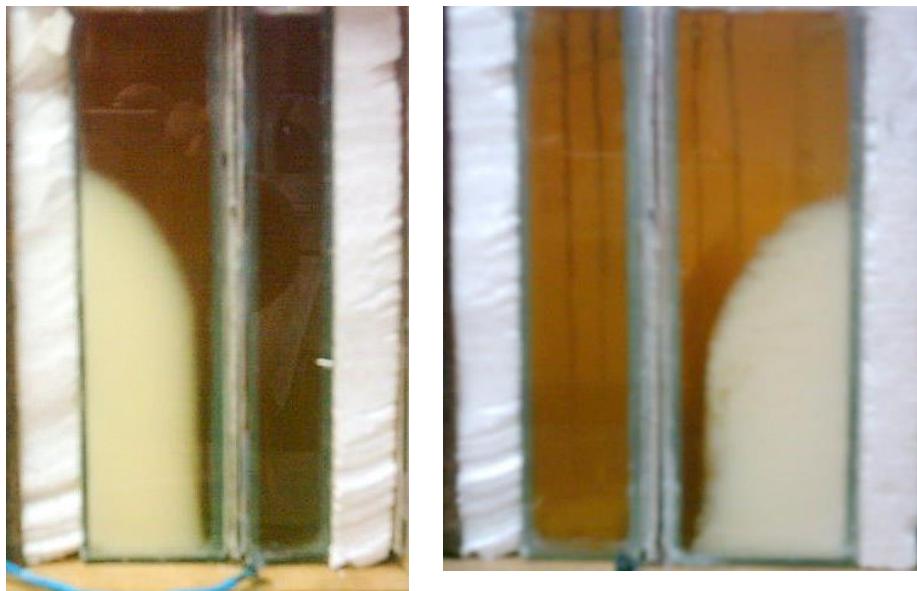


Figura 4.3: Esquema de la disposición de los sensores térmicos.

4.3.1.2. Visualización de la interfase: procesos de fusión y solidificación

En estas experiencias se observa que, al producirse la fusión, en la fase líquida surgen procesos del tipo convectivo, los que se hacen más notorios a medida que aumenta el espesor.



a: Modelos 4 y 2 a $t= 4.5$ horas. b: Modelos 3 y 5 a $t=5.5$ horas.

Figura 4.4: Proceso de calentamiento desde la pared lateral, para los modelos estudiados.

En la Figura 4.4a, se muestra la sustancia al cabo de cuatro horas y media de iniciado el proceso de calentamiento, para el modelo 4 (izquierda) y 2 (derecha); en la (b) se muestra la sustancia al cabo de cinco horas y media de iniciado el proceso de calentamiento, para el modelo 3 (izquierda) y 5 (derecha).

4.3.1.3. Medidas Térmicas

A fin de comparar los perfiles de temperaturas para los distintos recintos se los analiza separadamente; los resultados se presentan en las Figuras 4.5 y 4.6.

En la Figura 4.5a se muestra la evolución de las temperaturas del recinto 2 durante el calentamiento y enfriamiento y en 4.5b el correspondiente al recinto 4 para el mismo proceso. De igual manera en la Figura 4.6a y b se muestra la evolución de las temperaturas del recinto 3 y del recinto 5, respectivamente.

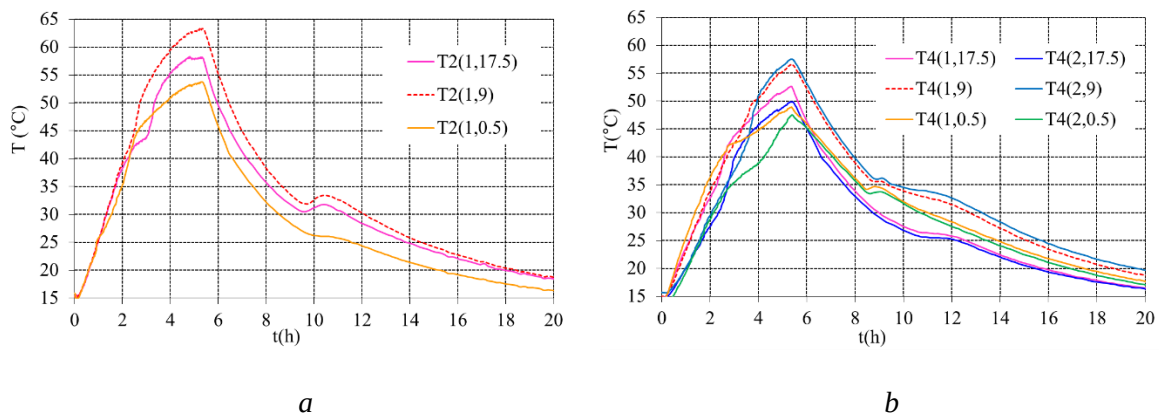


Figura 4.5: Evolución temporal de temperaturas en los recintos 2 y 4 durante el proceso de calentamiento y enfriamiento.

Analizando en forma general la evolución de las temperaturas en el interior de los recintos, a las cuatro horas de iniciado el calentamiento, se observa que en el interior de los modelos 2 (Figura 4.5 a) y 3 (Figura 4.6 a) todos los valores de temperatura superan los 40 $^{\circ}\text{C}$, por lo que la sustancia está completamente licuada; mientras que en los recintos 4 (Figura 4.5 b) y 5 (Figura 4.6 b) las temperaturas en el piso no alcanzan aún los 40 $^{\circ}\text{C}$, por lo que todavía existe sustancia en el estado sólido, lo que coincide con los registros fotográficos mostrados en la Figura 4.4, en la que en los recipientes de menor espesor la grasa se encuentra completamente líquida.

También puede observarse que, para todos los recintos y a diferentes tiempos de iniciado el calentamiento, los valores de temperatura a 1 y 2 cm de la pared que recibe calor, cercanos al centro y al techo de la cavidad ($Ti(1,9)$, $Ti(2,9)$, $Ti(1,17.5)$ y $Ti(2, 17.5)$) aumentan súbitamente ubicándose por encima de los valores de temperatura próximas al piso ($Ti(1,0.5)$ y $Ti(2,0.5)$);

estos cambios repentinos son generados cuando el fenómeno de convección comienza a cobrar importancia.

Durante la etapa de enfriamiento, en todos los modelos, se puede apreciar entre las ocho y once horas de iniciado el calentamiento el “fenómeno de sub-enfriamiento” que parece ser característico de la grasa vacuna y se discutirá en el capítulo siguiente.

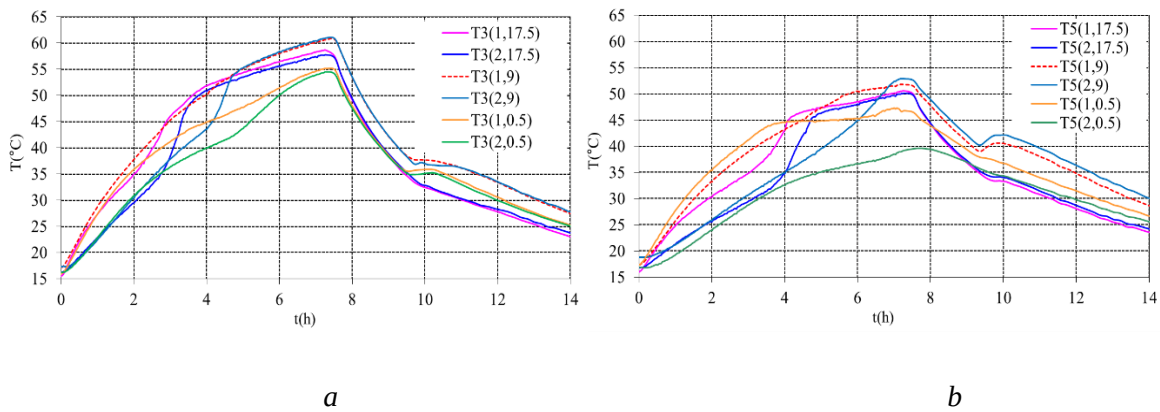


*Figura 4.6: Evolución temporal de temperaturas, proceso de calentamiento y enfriamiento.
a: recinto 3 y b: recinto 5.*

En la Figura 4.6a se advierte que a las cinco horas y media de iniciado el calentamiento en el modelo 3 la región central se encuentra a mayor temperatura: $T3(1,9)=T3(2,9)\approx 57^\circ\text{C}$, valores que siguen aumentando por el ingreso constante de flujo de calor; luego sigue la de la zona cercana al techo $T3(1,17.5)=56^\circ\text{C}$, $T3(2,17.5)=55^\circ\text{C}$ y luego la región más fría cercana al piso con temperaturas entre 35 y 50°C . En el modelo 4 (Figura 4.5b) para este mismo tiempo se registra un comportamiento similar con temperaturas ligeramente inferiores. En el modelo 5 (Figura 4.6b) para este tiempo, de acuerdo a los registros obtenidos: $T5(1,9)=48^\circ\text{C}$, $T5(2,9)=40^\circ\text{C}$, $T5(1,17.5)=T5(2,17.5)\approx 47^\circ\text{C}$, $T5(1,0.5)=45.5$ y $T5(2,0.5)=35.9^\circ\text{C}$, solo existe sustancia en el estado sólido en la región cercana al piso a 2 cm de la pared que recibe calor. Para el mismo tiempo en el modelo 2 (Figura 4.5a) se observan temperaturas mucho más altas: la temperatura máxima alcanzada por la sustancia de cambio de fase es $T2(1,9)=63^\circ\text{C}$ en el centro de la cavidad. Por lo tanto, como en los otros modelos la zona central es más caliente. Las temperaturas registradas en la zona cercana al techo están por arriba de las registradas en la zona cercana al piso, al igual que en los otros modelos. La sustancia se encuentra completamente líquida en este último caso.

A fin de analizar lo que sucede a diferentes distancias de la pared calentada, se muestra en la Figura 4.7 la evolución de las temperaturas para el modelo 3 en $x=1$ y 2 cm . Se observa que, en la etapa inicial, el aumento de temperatura es más o menos uniforme a diferentes alturas ($y=0,5\text{ cm}$ zona cercana al piso; $y=9\text{ cm}$ zona media de la cavidad, $y=17,5\text{ cm}$ zona cercana al

techo). Entre las dos y tres horas de iniciado el calentamiento se producen incrementos de temperatura repentinos en la región cercana al techo $T3(1, 17.5)$ y luego en el centro $T3(1,9)$, según se puede apreciar en la Figura 4.7a para $x=1$ cm. Para un tiempo ligeramente mayor en $x=2$ cm (Fig. 4.7b) el comportamiento es similar, solo que los cambios son más notables.

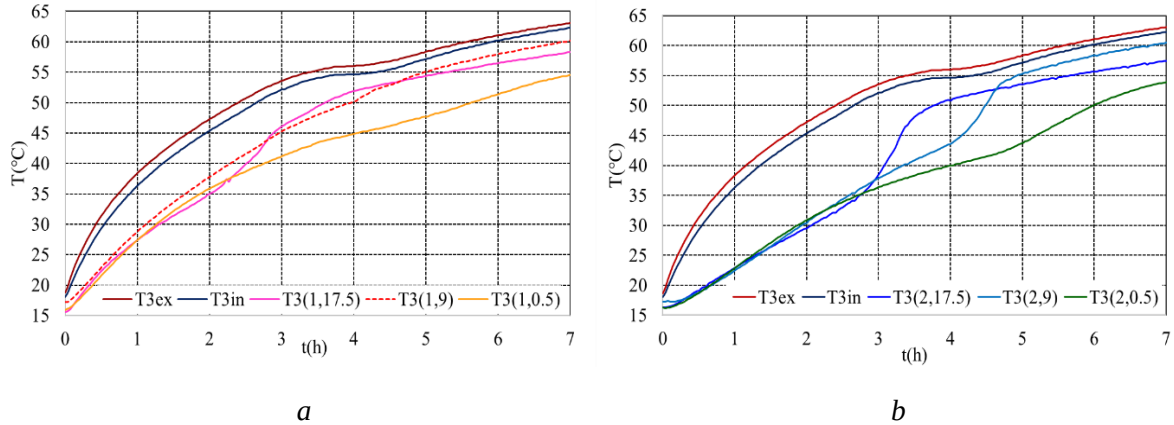


Figura 4.7: Evolución temporal de las temperaturas en el modelo 3. a: $x=1$ cm y b: $x=2$ cm.

Este comportamiento obedece al flujo convectivo que se establece en la cavidad, ya que la grasa líquida más caliente por diferencia de densidad es arrastrada a lo largo de la pared caliente hacia el techo, luego se desplaza sobre el mismo hacia la pared más fría y dependiendo de la evolución del flujo antes de llegar a la pared opuesta descende acercándose hacia la zona central hasta llegar al piso y completar el ciclo.

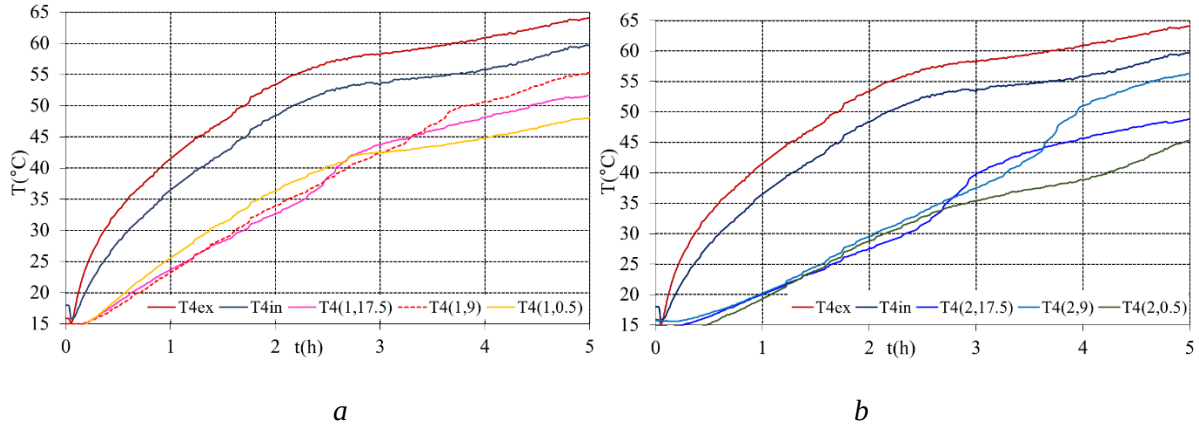


Figura 4.8: Evolución temporal de las temperaturas en el modelo 4. a: $x=1$ cm y b: $x=2$ cm.

En el modelo 4 se observa idéntico comportamiento, tal como se puede apreciar en la Figura 4.8. El tiempo en el que ocurren estos cambios repentinos después de iniciado el calentamiento marca el establecimiento de la convección natural dentro del recinto que contiene el material de cambio de fase. En el caso del modelo 5 (figura 4.9), los cambios se producen entre las tres y las cuatro horas de iniciado el calentamiento; esto puede deberse a la mayor cantidad de

sustancia contenida en este recinto lo que contribuye a una mayor inercia térmica. Con respecto a la temperatura de la zona cercana al piso crece en forma uniforme con el tiempo, incluso durante el tiempo en que el flujo convectivo se mantiene o disminuye ligeramente, lo que se debe a que el fluido más frío llega a esta zona siguiendo el ciclo convectivo. Esto último está de acuerdo con las fotos registradas (figura 4.4) donde la sustancia de cambio de fase de la zona cercana al piso cercana y a la pared opuesta a la calentada es la que permanece sin fundirse a las cinco horas de iniciado el calentamiento.

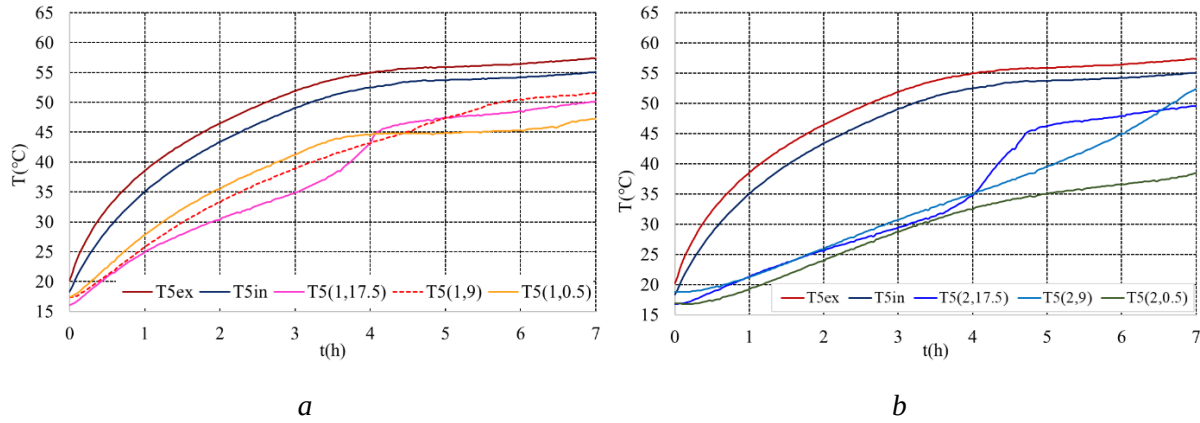


Figura 4.9: Evolución temporal de las temperaturas, modelo 5. a: $x=1 \text{ cm}$, b: $x=2 \text{ cm}$.

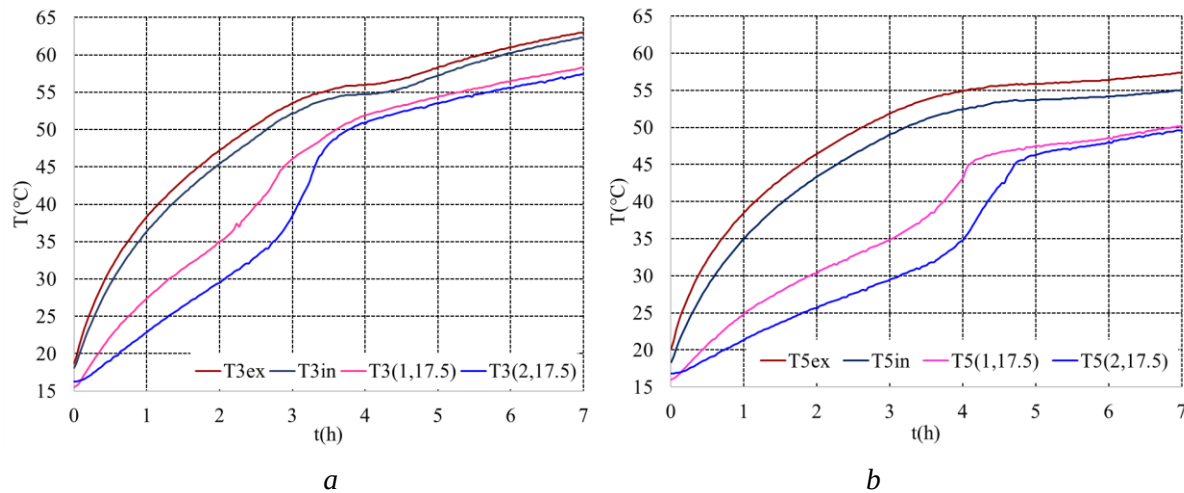


Figura 4.10: Evolución temporal de las temperaturas en el techo ($y=17,5 \text{ cm}$), $x=1 \text{ cm}$ y $x=2 \text{ cm}$. a: modelo 3; b: modelo 5.

De los registros térmicos también se puede determinar el tiempo para el cual el frente de fusión alcanza los 2 cm medidos a partir de pared que recibe calor y a diferentes alturas, lo que se presenta en las Figuras 4.10 (techo), 4.11 (centro) y 4.12 (piso). En la Figura 4.10a se muestra que en el modelo 3 las temperaturas en el techo se uniformizan para $x=1$ y $x=2 \text{ cm}$ a las tres horas y media, por lo que puede decirse que para este tiempo la sustancia está completamente líquida a 2 cm de la pared caliente; en la Figura 4.10b para el modelo 5 este

tiempo es mayor: cinco horas. Según se aprecia en la Figura 4.11 en el centro las temperaturas para $x=1$ y 2 cm se uniformizan a las cuatro horas veinticuatro minutos para el modelo 3 y en el modelo 5 esto ocurre más allá de las seis horas.

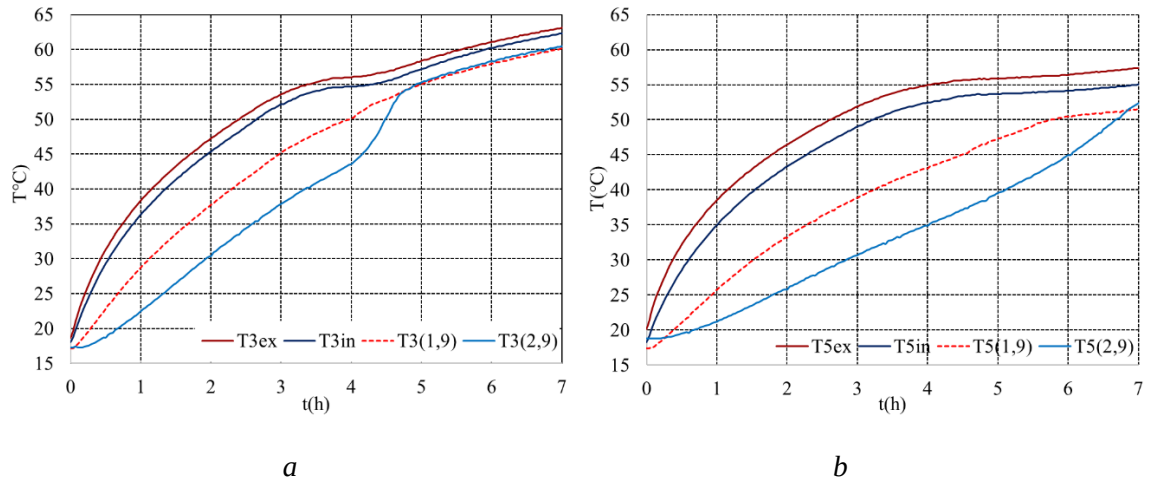


Figura 4.11: Evolución temporal de las temperaturas en el centro ($y=9$ cm), $x=1$ cm y $x=2$ cm. a: modelo 3; b: modelo 5.

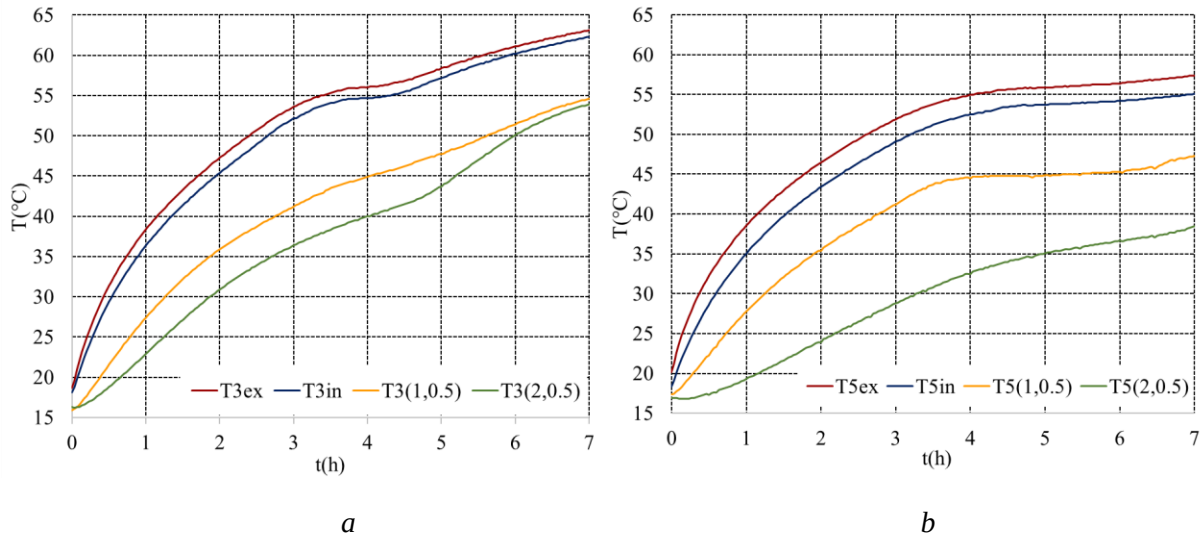


Figura 4.12: Evolución temporal de las temperaturas en el piso ($y=0,5$ cm), $x=1$ cm y $x=2$ cm. a: modelo 3; b: modelo 5.

Las temperaturas en el piso para $y=0,5$ cm según se observa en la figura 4.12a en el modelo 3 se uniformizan a las seis horas cuando ambas se acercan a los 50°C . De este análisis puede afirmarse que por el efecto convectivo la región que se licua más rápidamente, más allá de la cercana a la pared caliente, es la cercana al techo, luego el centro y por último la región próxima al piso, lo que coincide con los registros fotográficos (figura 4.4) que muestran la forma que tiene el frente de fusión. Además, puede decirse que para la potencia ensayada en el modelo 3

toda la sustancia de cambio de fase está en estado líquido a las seis horas, mientras que, en el modelo 5 aún hay material sólido presente.

4.3.1.4. Estimación del Coeficiente convectivo sobre la pared calentada

Para el cálculo del coeficiente convectivo en la grasa, se asume que el calor transferido por conducción a través de la superficie del vidrio es el involucrado en el proceso convectivo entre la pared caliente y grasa líquida (Burmeister, 1983), utilizándose la siguiente expresión para calcularlo:

$$h = \frac{k (T_{in} - T_{ex})}{e (T_{in} - T_{gr})} \quad (4.1)$$

Donde, donde el coeficiente (k/e) tiene en cuenta la conductividad térmica y el espesor del vidrio en la pared caliente, T_{in} : la temperatura en la superficie interna de la pared de la cavidad, T_{ex} la temperatura en la superficie externa y T_{gr} : la temperatura en la grasa en el centro de la cavidad.

Así el coeficiente convectivo para el modelo 4 resulta de 230 ± 11 (W/m² K).

4.3.1.5. Conclusiones

Se analizan los procesos de fusión y solidificación, en un recinto rectangular calentado desde una superficie lateral. Se observa el avance del frente de fusión y la presencia de efectos convectivos que lo modifican. Para espesores pequeños, menores a 2 cm, dichos efectos son despreciables, por lo que el frente de fusión avanza prácticamente sin deformación; mientras que, para espesores mayores, los efectos convectivos comienzan a cobrar importancia, a medida que aumenta el espesor del material, existiendo una mayor cantidad de líquido en la parte superior del recinto, respecto de la parte inferior.

A fin de analizar lo que sucede a diferentes distancias de la pared calentada, se considera la evolución de las temperaturas para los modelos ensayados en $x=1$ y 2 cm. Se observa que, en principio, el aumento de temperatura es más o menos uniforme a las diferentes alturas (zona cercana al piso; centro de la cavidad, zona cercana al techo); pero entre las dos y tres horas de iniciado el calentamiento se producen incrementos de temperatura repentinos en la región cercana al techo ($T_i(x, 17.5)$) y luego en el centro $T_i(x, 9)$ con $i=3, 4$ y 5, según se puede apreciar en las figuras 4.7a, 4.8a y 4.9a para $x=1$ cm. Para un tiempo ligeramente mayor en $x=2$ cm (figuras 4.7b, 4.8b y 4.9b) el comportamiento es similar, solo que los cambios son más notables. El tiempo en el que ocurren estos cambios repentinos después de iniciado el calentamiento marca el establecimiento de la convección natural dentro del recinto que contiene el material de cambio de fase.

Con respecto a la zona cercana al piso se observa que la temperatura en esta región crece lentamente en forma uniforme con el tiempo, incluso durante el tiempo en que el flujo convectivo se mantiene o disminuye ligeramente, lo que se debe a que fluido más frío llega a esta zona siguiendo el ciclo convectivo. Este comportamiento térmico en la zona cercana al piso está de acuerdo con las fotos registradas (figura 4.4) donde la sustancia de cambio de fase de la zona cercana al piso y a la pared opuesta a la calentada es la que tarda más tiempo o permanece sin fundirse en los modelos de mayor espesor, más allá de las cuatro horas de iniciado el calentamiento.

La estimación del coeficiente de convección h contribuye al mejor entendimiento del fenómeno y proporciona un parámetro importante para la posterior modelización del comportamiento de ésta y de otras grasas orgánicas de similares características.

4.3.2. Caso 2: Modelos 6, 7, 8 y 10.

Continuando con el estudio del fenómeno de convección natural, se extendió el abordaje experimental con recintos diferentes espesores en la dirección del flujo de calor, pero con las mismas dimensiones en la pared calentada. Se analiza la evolución temporal de la distribución de temperaturas en el interior de la sustancia y el avance del frente de fusión, conjuntamente con su inclinación y fracción de líquido durante el mencionado proceso.

4.3.2.1. Dispositivo Experimental

Los ensayos experimentales se dividen en dos etapas, primero se trabaja con los recintos de 6 y 7 cm de espesor, designados como modelos 6 y 7; se registran medidas térmicas durante el proceso de fusión y se obtienen registros fotográficos; luego, se ensayan los recipientes de 8 y 10 cm de espesor (modelos 8 y 10) (Figura 4.13). Los sensores térmicos se ubicaron de la siguiente manera: 1 sensor en el centro de la superficie exterior e interior de la pared calentada; 3 sensores a 2 cm de la pared calentada: el primero a 0,5 cm del techo, el segundo en el centro del recinto y el tercero a 0,5 cm del piso; 3 sensores a 4 cm de la pared calentada, a la misma altura que los anteriores. Para los dos recintos se emplearon 16 termocuplas que se muestran en la Figura 4.14, además los demás elementos utilizados en cada ensayo experimental.

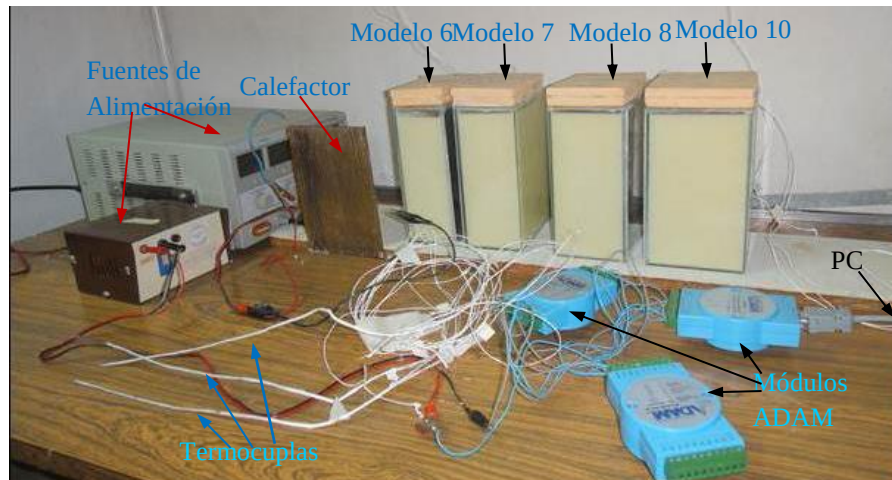


Figura 4.13: Fotografía del dispositivo experimental, mostrando todos los elementos utilizados.

En la tabla 4.3 se suministra información detallada de las dimensiones de los modelos ensayados, la ubicación y notación para los sensores térmicos y las potencias ensayadas.

Modelo	Espesor	Dimensión (cm ³)	Volumen (m ³)	Sensores en el interior de la sustancia $T_i(x,y)r$	Sensores en la pared calentada
6	6 cm	(6x12x18)	0,0013	T6(2, 0.5), T6(2,9) T6(2, 17.5), T6(4, 0.5) T6(4, 9), T6(4, 17.5)	T6 _{in} , T6 _{ex}
7	7 cm	(7x12x18)	0,0015	T7(2, 0.5), T7(2,9) T7(2, 17.5), T7(4, 0.5) T7(4, 9), T7(4, 17.5)	T7 _{in} , T7 _{ex}
8	8 cm	(8x12x18)	0,0017	T8(2, 0.5), T8(2,9) T8(2, 17.5), T8(4, 0.5) T8(4, 9), T8(4, 17.5)	T8 _{in} , T8 _{ex}
10	10 cm	(10x12x18)	0,0022	T10(2, 0.5), T10(2,9) T10(2, 17.5), T10(4, 0.5) T10(4, 9), T10(4, 17.5)	T10 _{in} , T10 _{ex}
Potencia aplicada (W)			12		

Tabla 4.3: Información detallada de los modelos ensayados en el Caso 2.

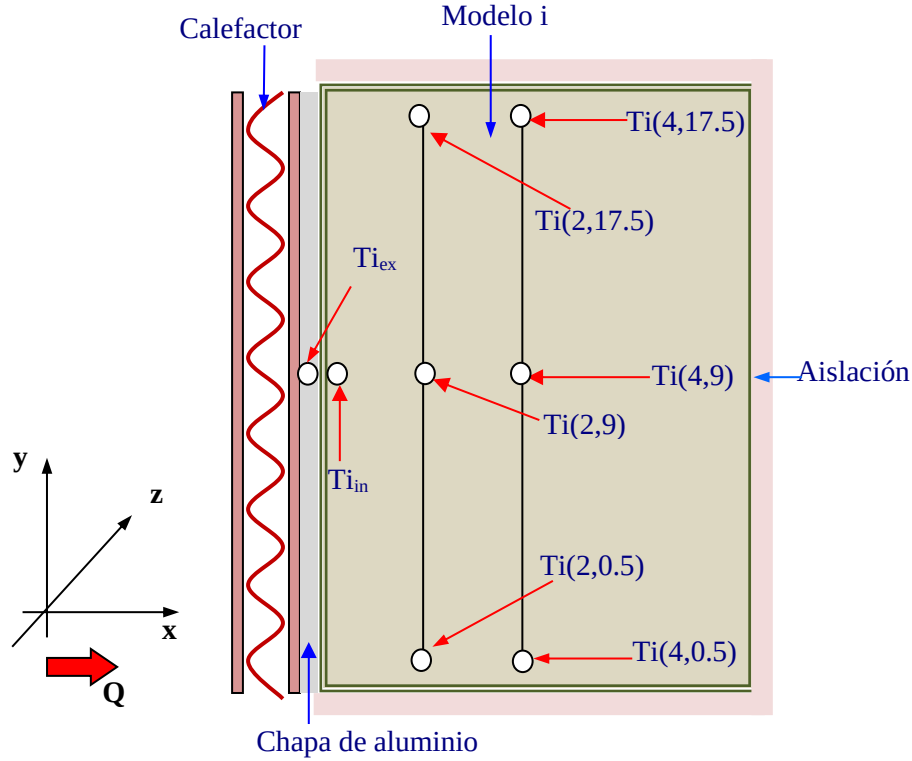


Figura 4.14: Ubicación de los sensores térmicos y dirección del flujo de calor.

4.3.2.2. Medidas Térmicas

Las experiencias realizadas con los modelos 6 y 7, se desarrollan durante aproximadamente veinticuatro horas; la etapa de calentamiento se extiende entre ocho y doce horas y la de enfriamiento, igual tiempo. Dependiendo de la temperatura ambiente para una potencia de calentamiento de 12 W, entre las ocho y las doce horas de iniciado el calentamiento, se ha fundido en su totalidad el material del modelo 6.

Los resultados obtenidos se muestran en la Figuras 4.15 y 4.16. Si bien durante el calentamiento, los recintos y el calefactor permanecen aislados, durante la etapa de enfriamiento se retira la aislación para evitar la formación de pequeños núcleos, donde la sustancia podría permanecer en estado líquido, en el interior de la masa sólida.

En ambos modelos, una vez iniciado el calentamiento, las temperaturas exterior e interior en la pared calentada crecen en forma logarítmica (curvatura cóncava), de modo que la diferencia de temperaturas entre las superficies interior y exterior es siempre creciente. Aproximadamente, a las dos horas de iniciado el proceso, esta diferencia se estabiliza entre 7 y 10 °C, y aunque la temperatura en ambas superficies continúa creciendo, la diferencia se mantiene prácticamente constante, hasta el final de la etapa de calentamiento. En el modelo 7, se observa que los perfiles de temperatura son más suaves y en general, los valores alcanzados son menores en 1° C que las registradas en el modelo 6, lo que puede deberse a la mayor inercia

que ofrece éste, al tener mayor cantidad de PCM. Los perfiles de temperatura registrados en el interior del material muestran incrementos de temperatura que dependen de la distancia a la pared calentada.

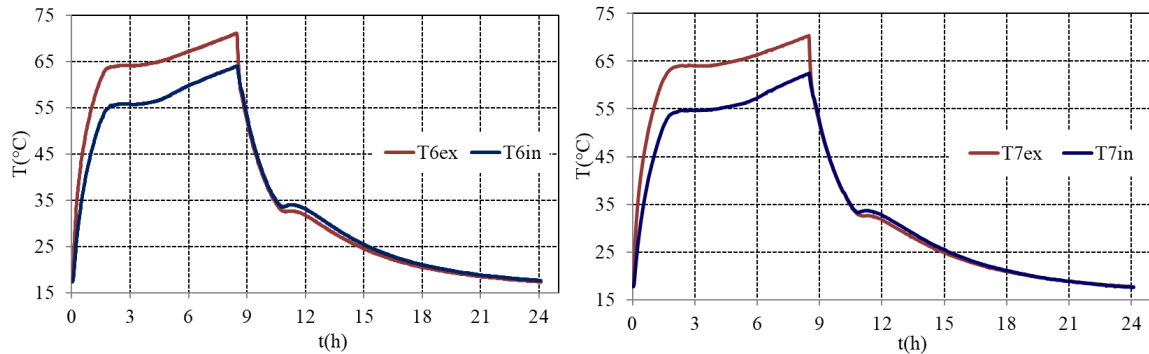


Figura 4.15: Evolución de los valores de temperatura en la pared caliente, modelos 6 y 7.

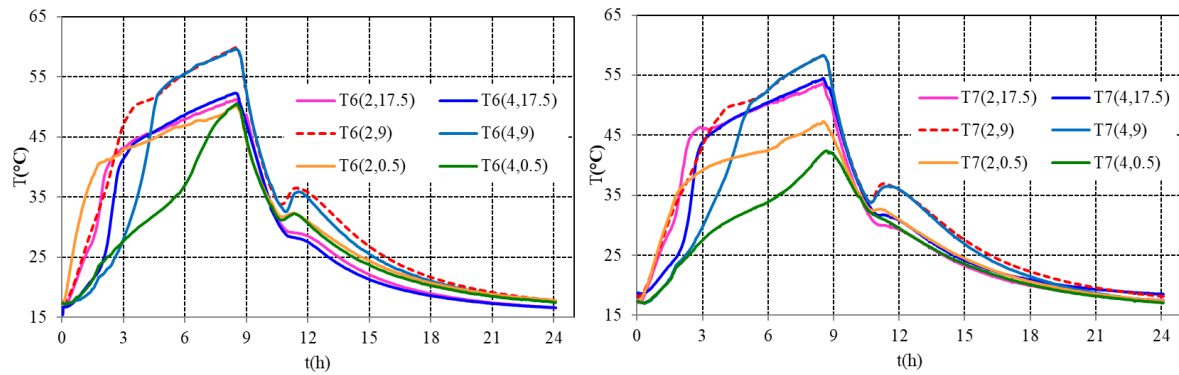


Figura 4.16: Evolución de los valores de temperatura en el interior de los modelos 6 y 7.

En la Figura 4.17, se muestra las temperaturas próximas al techo ($y=17,5$ cm), a 2 y 4 cm de la pared que recibe el calor, T6(2,17.5), T6(4,17.5), T7(2,17.5) y T7(4,17.5)) durante la etapa de calentamiento, para los modelos 6 y 7; conjuntamente con las exterior e interior en la pared calentada del modelo en su punto medio. En ella se observa que, en la primera hora de iniciado el proceso, éstas crecen lentamente, en forma casi lineal y luego exponencialmente hasta que, aproximadamente luego de dos horas adoptan un perfil similar al de la pared calentada, pero 15°C por debajo de ésta. En el modelo 6, la diferencia de temperatura entre $x=2$ y $x=4$ para $y=17,5$ cm, crece rápidamente desde el inicio del calentamiento, alcanzando un valor máximo de unos 14°C aproximadamente las dos horas, luego desciende rápidamente a 0°C cerca de las tres horas y media. En algunos casos esta diferencia se vuelve negativa, lo que puede atribuirse a que líquido muy caliente desciende desde el techo por la región central. En el modelo 7, la diferencia de temperatura entre $x=2$ y $x=4$ para $y=17,5$ cm, es también creciente desde el inicio del calentamiento y alcanza un valor máximo de alrededor de $12,3^{\circ}\text{C}$ aproximadamente las dos horas, luego se observa que rápidamente tiende a 0°C a las tres horas y media de iniciado el proceso.

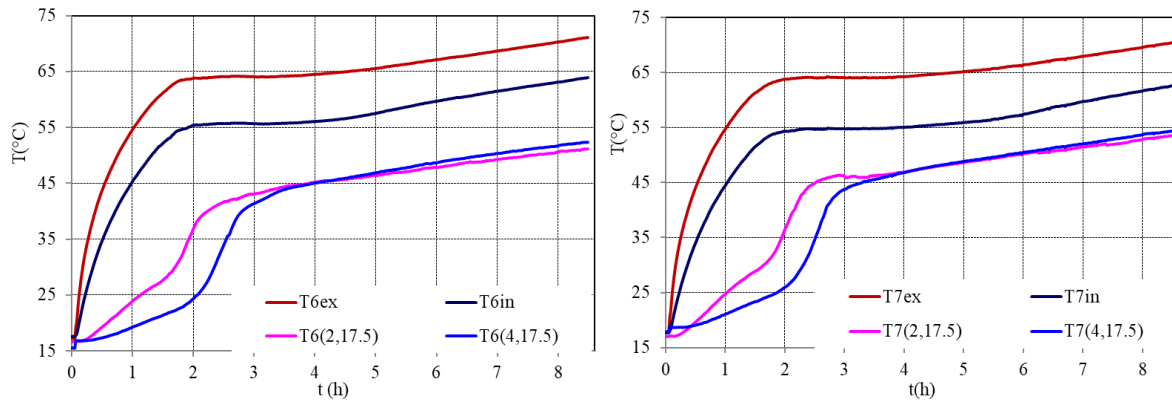


Figura 4.17: Evolución temporal de temperatura a 2 y 4 cm de la pared calentada, región del techo ($y=17,5$ cm), modelos 6 y 7.

Como se muestra en la Figura 4.18, en ambos modelos, las temperaturas registradas a 2 cm de la pared calentada ($T6(2,9)$ y $T7(2,9)$), a igual distancia del techo y el piso ($y=9$ cm), presentan un crecimiento casi lineal hasta que, aproximadamente a partir de las tres horas y media y cuatro horas doce minutos, respectivamente, de iniciado el calentamiento los perfiles adquieren una pendiente igual al de las temperaturas registradas en la pared calentada. A la misma altura, las temperaturas registradas a 4 cm de la pared calentada ($T6(4,9)$ y $T7(4,9)$) muestran un crecimiento exponencial (curva convexa) hasta unas cuatro horas y media y cinco horas doce minutos respectivamente y luego toman una pendiente igual al de temperaturas de la pared calentada y se superponen con las correspondientes $T6(2,9)$ y $T7(2,9)$; lo que muestra que se requiere un determinado tiempo para que se funda el material y uniformice su temperatura en la región central de la cavidad. La diferencia de comportamiento en la evolución temporal de las temperaturas a 2 y 4 cm de la pared calentada, está relacionado con el predominio del proceso conductivo hasta los 2cm y la existencia de conducción y convección a los 4 cm, transcurrido dos horas y media de iniciado el calentamiento.

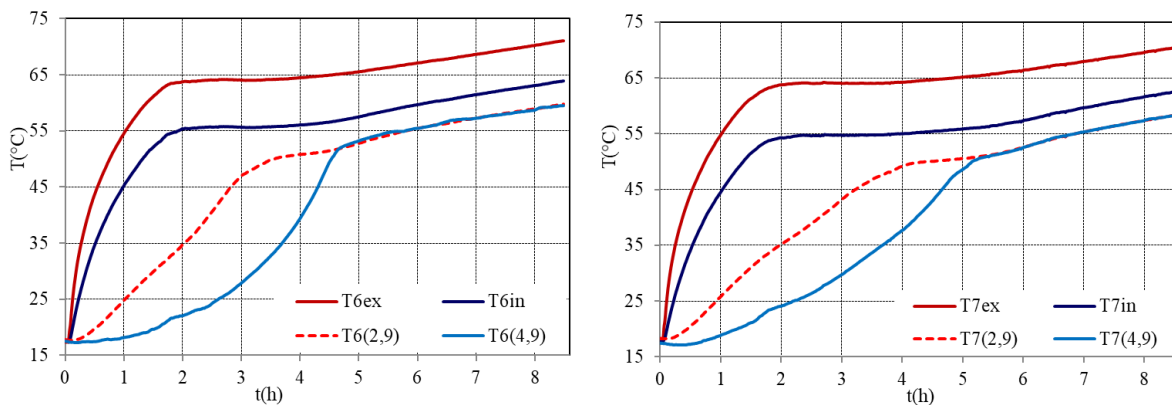


Figura 4.18: Evolución temporal de temperaturas a 2 y 4 cm de la pared calentada, región central ($y=9$ cm), modelos 6 y 7.

De acuerdo a la Figura 4.19, en ambos modelos, las temperaturas registradas a 2 cm de la pared calentada, próximas al piso: (T6(2,0.5) y T7(2,0.5)) se observa un crecimiento (curva cóncava), con un perfil de temperaturas similar al de la pared calentada, pero con valores notablemente inferiores. En la misma región, las temperaturas a 4 cm de la pared calentada (T6(4,0.5) y T7(4,0.5)), presentan un crecimiento con menor pendiente que las anteriores (curvas convexas) hasta que adquieren una pendiente igual al perfil de temperaturas de la pared calentada y se superponen con las T6(2,0.5) y T7(2,0.5) respectivamente, al cabo de unas siete horas de iniciado el calentamiento. Esto muestra que transcurrido un tiempo suficientemente largo se uniformiza la temperatura del material en esta región.

En el modelo 6, la diferencia de temperatura entre $x=2$ y $x=4$ para $y=0,5$ cm, es creciente desde el inicio del calentamiento y alcanza un valor máximo de alrededor de $13,3^{\circ}\text{C}$ aproximadamente a una hora cuarenta y dos minutos, luego desciende lentamente hasta alcanzar los 7°C a las cinco horas treinta y seis minutos aproximadamente y de allí desciende más rápidamente a 0°C cerca de las siete horas. En el modelo 7 la diferencia de temperatura entre $x=2$ y $x=4$ para $y=0,5$ cm, es creciente desde el inicio del calentamiento y alcanza un valor máximo de alrededor de $12,6^{\circ}\text{C}$ aproximadamente una hora cincuenta y cuatro minutos, luego desciende lentamente hasta alcanzar los $8,5^{\circ}\text{C}$ a las siete horas, luego más lentamente observándose que tiende a 0°C . Para la potencia de calentamiento, en estas experiencias no se alcanza el tiempo suficiente para fundir el material en esta región.

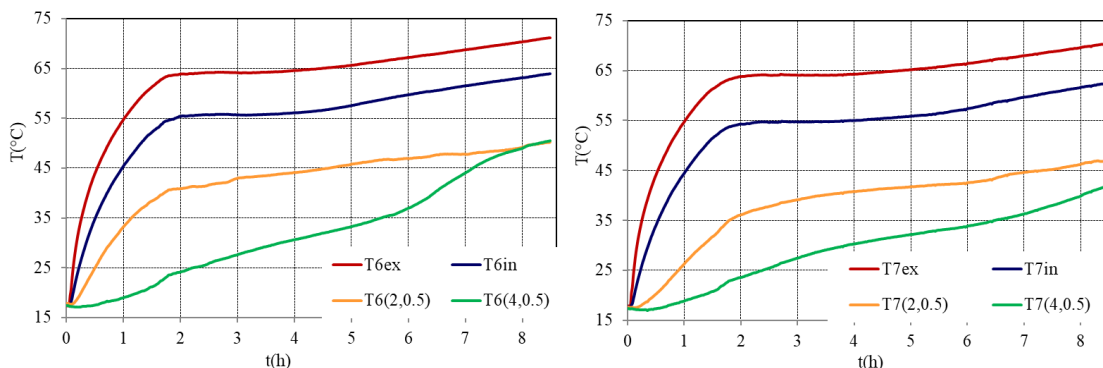


Figura 4.19: Evolución temporal de temperatura a 2 y 4 cm de la pared calentada, región del piso ($y=0,5$ cm), modelos 6 y 7.

En el caso de los modelos 8 y 10 las experiencias se extienden entre veintiséis y treinta horas, la etapa de calentamiento se prolonga entre diez y trece horas (figura 4.20), ya que al contener los recintos mayor cantidad de sustancia, para la misma potencia ensayada (12 W) en los modelos 6 y 7 se requiere mayor tiempo para visualizar el proceso de fusión de todo el material. Para la potencia mencionada la diferencia de temperatura entre la superficie interior y exterior de la pared calentada en las primeras dos horas crece y luego se estabiliza entre 10 y 14°C hasta que finaliza el calentamiento.

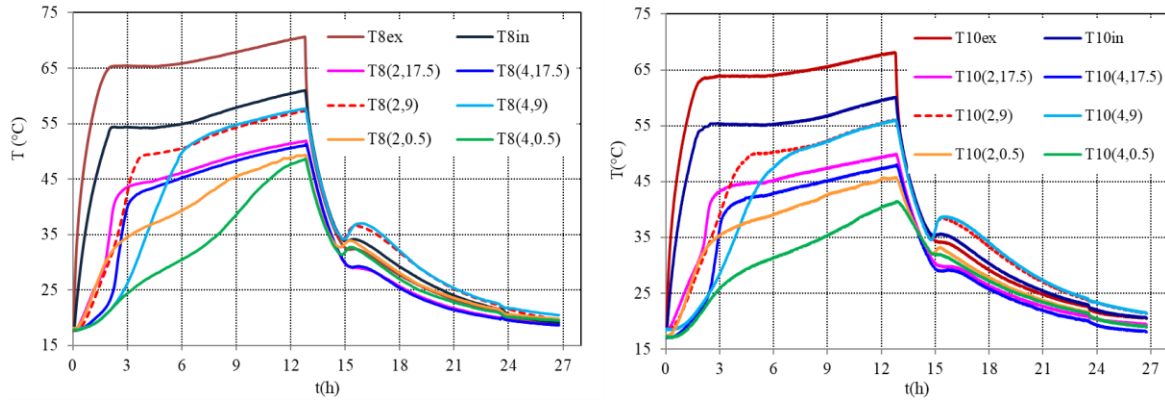


Figura 4.20: Evolución temporal de temperaturas, modelos 8 y 10 durante las etapas de calentamiento y enfriamiento.

En ambos modelos los valores de temperatura a 2 cm y 4 cm de la pared calentada en la región cercana al techo ($T8(2,17.5)$, $T8(4,17.5)$, $T10(2,17.5)$ y $T10(4,17.5)$) crecen rápidamente, sobre todo las que corresponden a $x=2$ cm. El crecimiento en las primeras horas es en forma exponencial (curva convexa) hasta que alcanzan la forma y pendiente del perfil en la pared calentada después de las tres horas de iniciado el proceso (Figura 4.21). En el modelo 8 los valores de temperatura cercanos al techo a 2cm y 4 cm de la pared calentada registran una diferencia máxima de $14,7^{\circ}\text{C}$ a dos horas dieciocho minutos y en el modelo 10 esta diferencia es de $14,2^{\circ}\text{C}$ a dos horas veinticuatro minutos. Entre las tres y cuatro horas esta diferencia disminuye rápidamente y es inferior a 3°C . En el modelo 8, si bien $T8(2,17.5)$ y $T8(4,17.5)$ no se intersectan ambos perfiles continúan evolucionado con una diferencia de temperatura que no supera 1°C . En tanto que, en el modelo 10 los perfiles de temperatura $T10(2,17.5)$ y $T10(4,17.5)$ avanzan paralelos con una diferencia de 2°C .

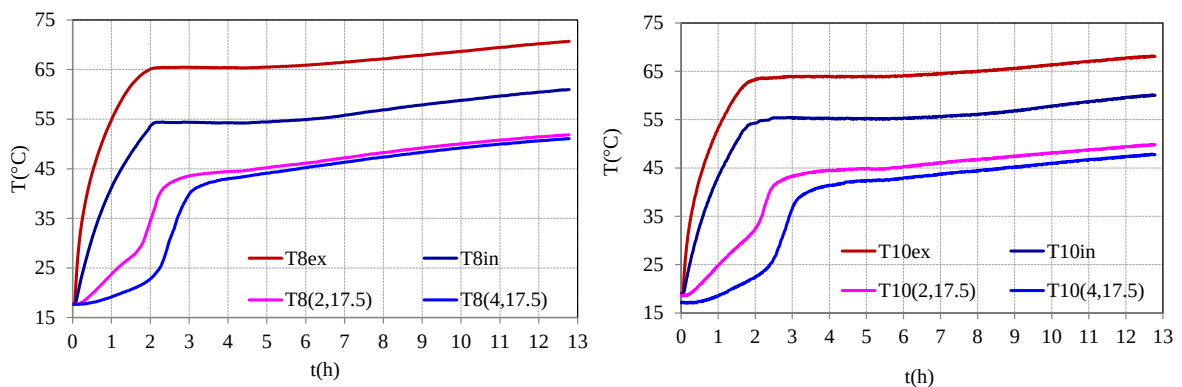


Figura 4.21: Evolución temporal de temperaturas a 2 y 4 cm de la pared calentada, región del techo ($y=17,5$ cm), modelos 8 y 10.

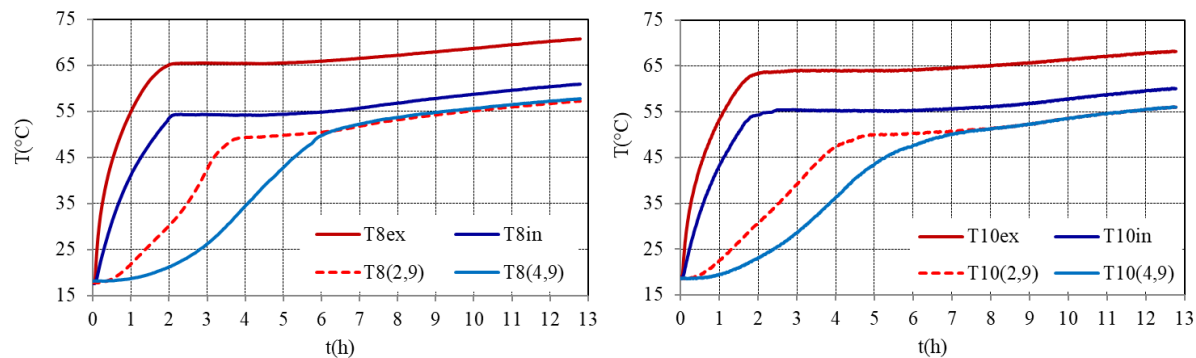


Figura 4.22: Evolución temporal de temperaturas a 2 y 4 cm de la pared calentada, región central ($y=9$ cm), modelos 8 y 10.

En la Figura 4.22, se observa que en ambos modelos los valores de temperatura a 2 cm de la pared calentada en la región central, $T8(2,9)$ y $T10(2,9)$, crecen en las primeras tres horas de iniciado el calentamiento en forma exponencial (curva convexa) hasta alcanzar la forma y pendiente del perfil en la pared calentada luego se intersectan con los perfiles de temperatura, $T8(4,9)$ y $T10(4,9)$, que se ubican a 4 cm de la pared calentada, observándose que después de la tres horas se uniformiza la temperatura en esta zona. Los perfiles, $T8(4,9)$ y $T10(4,9)$, tienen un crecimiento más lento pero la forma del perfil es similar a los que se ubican a 2 cm de la pared calentada. En el modelo 8 los valores de temperatura de los sensores que se encuentran a 2 cm y los que se ubican a 4 cm de la pared calentada registran una diferencia máxima de $17,4^{\circ}\text{C}$ a las tres horas veinticuatro minutos y el modelo 10 esta diferencia máxima es de 12°C a las tres horas treinta y seis minutos. Esta diferencia se anula en el modelo 8 a las seis horas de iniciado el calentamiento y en el modelo 10 a las siete horas doce minutos.

De acuerdo a la figura 4.23, en ambos modelos los valores de temperatura a 2 cm de la pared calentada en la región cercana al piso ($y=0,5$ cm) ($T8(2,0,5)$ y $T10(2,0,5)$) crecen muy lentamente, en las primeras horas de iniciado el calentamiento (curva convexa) y se podría decir que alcanzan la forma y pendiente del perfil de la pared calentada después de las nueve horas de comenzado el proceso. Los perfiles $T8(4,0,5)$ y $T10(4,0,5)$ tienen un crecimiento mucho más lento pero la forma del perfil es similar a los que se ubican a 2 cm de la pared calentada. En el modelo 8 los valores de temperatura de los sensores que se encuentran a 2 cm y los que se ubican a 4 cm de la pared calentada registran una diferencia máxima de $11,5^{\circ}\text{C}$ a dos horas dieciocho minutos y en el modelo 10 esta diferencia es 11°C a dos horas doce minutos. En el modelo 8, esta diferencia disminuye lentamente hasta los $8,5^{\circ}\text{C}$ a las siete horas, para anularse luego a las doce horas y media de iniciado el calentamiento. En el modelo 10 dada la potencia de calentamiento no llega a uniformizarse la temperatura en esta región ya que todavía queda material en el estado sólido, pero se observa que el comportamiento es similar al modelo 8 por lo que la diferencia entre los valores de temperatura, $T10(2,0,5)$ y $T10(4,0,5)$, se anulan en un tiempo posterior.

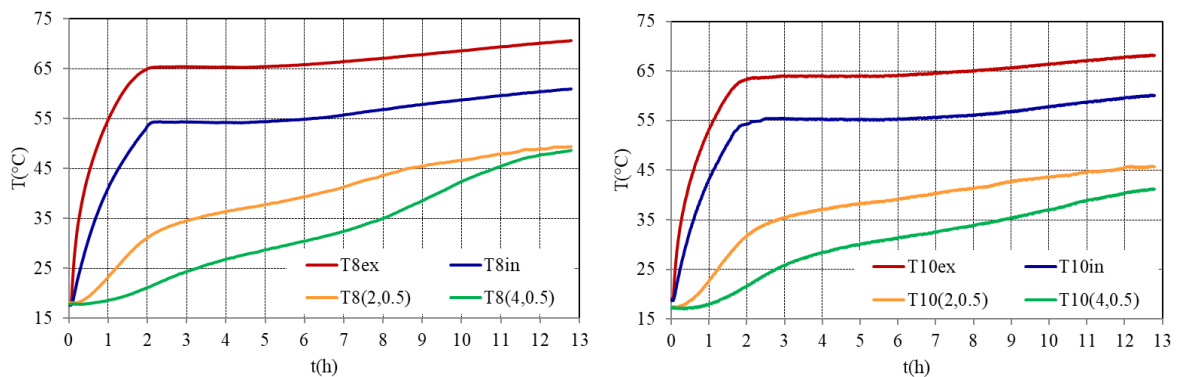


Figura 4.23: Evolución de los valores de temperatura a 2 y 4 cm de la pared calentada en la región del piso ($y=0,5$ cm) en los modelos 8 y 10.

Hacia el final de la etapa de calentamiento, en el modelo 8 las zonas central, cercana al piso y el techo alcanzan una temperatura de 57, 48,2 y 51°C, respectivamente; con la sustancia en estado líquido. En general la zona central es la más caliente luego le sigue el techo y por último la cercana al piso.

4.3.2.3. Etapas del Proceso de Fusión. Visualización y medidas térmicas

Como ya se mencionó anteriormente, el proceso de fusión de un PCM en un recinto rectangular calentado desde una pared lateral tiene tres etapas: régimen de conducción, transición del régimen conductivo-convectivo y régimen de convección pura.

La visualización de dichas etapas se realiza mediante registros fotográficos, los que se obtuvieron con una cámara digital montada sobre un trípode que se mantuvo en la misma posición durante toda la etapa del calentamiento. Se tomaron fotos cada quince o treinta minutos dependiendo de las condiciones de la experiencia.

En la Figura 4.24, se muestra estos registros para los modelos 6 y 7, los que se realizaron cada treinta minutos, durante un lapso de tiempo de ocho horas cuarenta y cinco minutos.

Para los modelos 8 y 10 también se obtuvieron registros fotográficos del proceso de fusión y se repitieron las experiencias a fin de determinar el intervalo de tiempo en el que se desarrolla el régimen puramente conductivo, transición a la convección y puramente convectivo; no mostrados en esta Tesis.

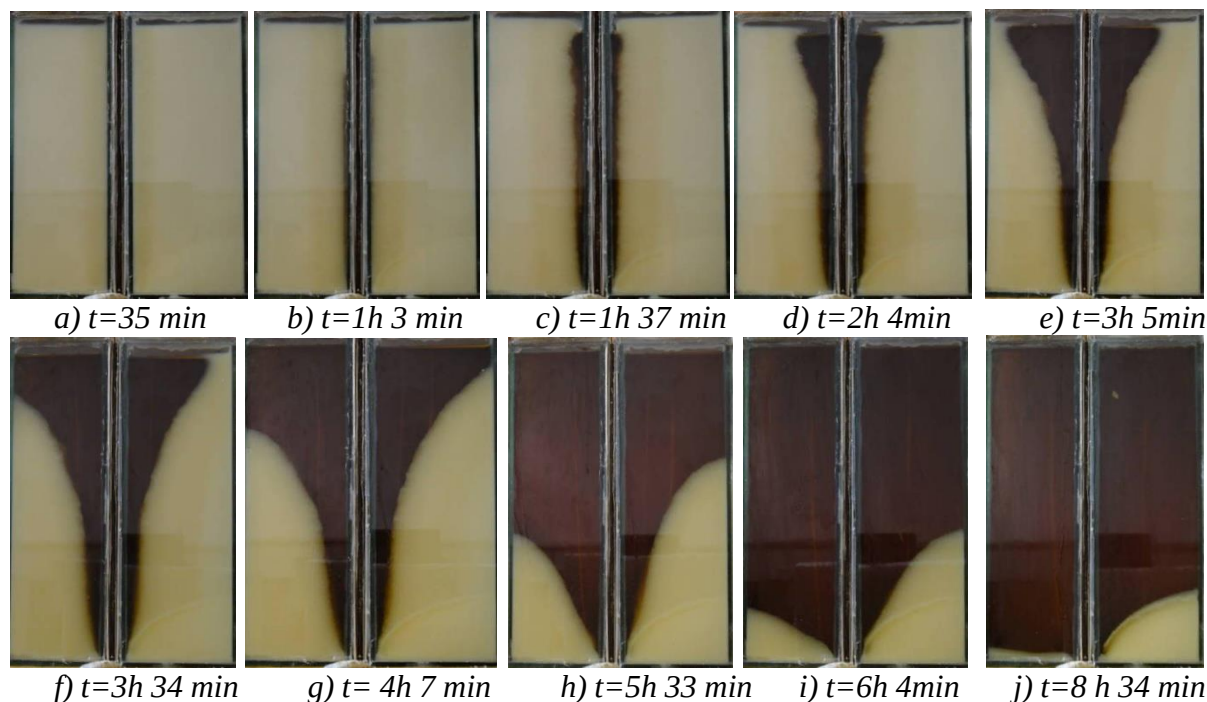


Figura 4.24: Registros fotográficos de la evolución temporal del proceso de fusión de una sustancia de cambio de fase. Modelos 6 y 7.

De la observación de la experiencia y registros fotográficos se advierte que al inicio del calentamiento el material cercano a la pared caliente cambia de color formando una franja más oscura paralela a ella. El primer indicio de sustancia fundida aparece aproximadamente a los cincuenta minutos y esta franja oscura continúa creciendo (figura 4.24 b), hasta aproximadamente una hora y media de iniciado el calentamiento; siendo la transferencia de calor puramente conductiva (figura 4.24 c). En esta primera etapa, en la pequeña capa de material fundido adyacente y paralela a la pared calentada, el calor se transfiere por conducción, debido al gradiente de temperatura que se genera entre la pared calentada (T_{in}) y la interface sólido - líquido.

Estos registros fotográficos se pueden relacionar con la evolución temporal de la temperatura en el interior del recipiente. En las figuras 4.25 y 4.26 se muestran los perfiles de temperaturas para el modelo 7 a diferentes distancias de la pared calentada, durante la etapa de calentamiento; en ellas se delinean las tres etapas mencionadas.

Se puede observar que, al principio de la etapa de calentamiento, los perfiles para x fijo a diferentes alturas son aproximadamente lineales muy próximos entre sí (Figura 4.25), lo que da cuenta que el frente de fusión avanza paralelo a la pared calentada sin deformaciones; esto ocurre entre una y dos horas de iniciado el calentamiento como ya se mencionó anteriormente considerando los registros fotográficos.

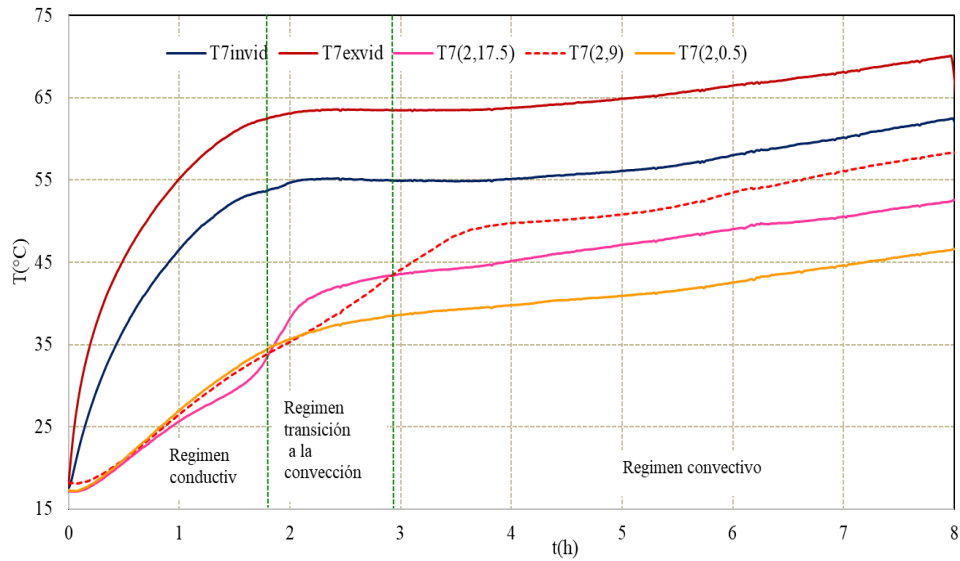


Figura 4.25: Evolución temporal de las temperaturas en el modelo 7, $x=2$ cm.

Transcurrido este tiempo, comienzan a visualizarse los efectos convectivos, que prevalecen sobre todo en la región superior del recinto, modificando la forma del avance de la frontera. Esta segunda etapa comienza cuando, las partículas de líquido más caliente se mueven hacia arriba y las más frías hacia abajo, debido a la diferencia de densidad. Esto da origen a una estratificación vertical en el seno del líquido, estableciéndose un gradiente vertical con isothermas horizontales. Al mismo tiempo se generan dos capas límites: una capa límite caliente adyacente a la pared calentada y una más fría adosada a la interface sólido - líquido. Esta etapa de transición finaliza cuando la frontera alcanza la esquina superior derecha del recinto: (figura 4.24f y g), se observa que esto ocurre entre las tres y cuatro horas. para los modelos 6 y 7, respectivamente. Según las medidas térmicas para el modelo 7, la etapa puramente convectiva, (figura 4.26) se inicia alrededor de las cuatro horas cuando se entrecruzan los perfiles $T(x,9)$ y $T(x,17.5)$ y luego evolucionan para alcanzar similares pendientes, paralelos a la pared calentada. Se infiere que el frente de fusión alcanza la pared opuesta más fría y a partir de ese instante, que depende del espesor de la muestra, la transferencia convectiva predomina sobre la conductiva reforzando la deformación del frente de fusión en la región superior y acelerando el proceso de fusión.

En la etapa final, el calor se transfiere principalmente por convección y la distribución de temperaturas en el seno del líquido y a lo largo de la pared calentada tiende al estado estacionario (figuras 4.21 y 4.22). Térmicamente los perfiles en la región superior continúan creciendo con temperaturas mayores a T_F (figura 4.26), ya que el efecto convectivo es importante en la región superior. Los registros fotográficos mencionados (figura 4.24 h, i, j), corresponden a esta etapa final, en los que se observa como el frente de fusión avanza descendiendo sobre la pared opuesta más fría.

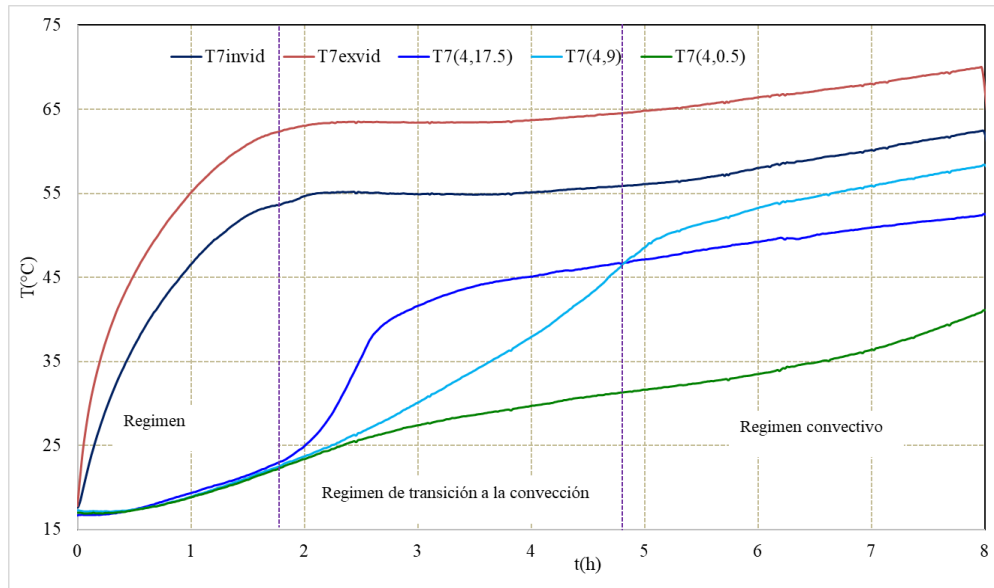


Figura 4.26: Evolución temporal de las temperaturas en el modelo 7, $x=4$ cm.

De los registros fotográficos se puede determinar la fracción de líquido presente en función del tiempo, lo que se muestra en la Figura 4.27. La fracción de líquido creciente con el tiempo, es siempre superior en el modelo 6, ya que este ofrece menor inercia. Después de las cinco horas de iniciado el calentamiento, la diferencia de fracción líquida entre ambos modelos se estabiliza y oscila entre un 16 y 19%.

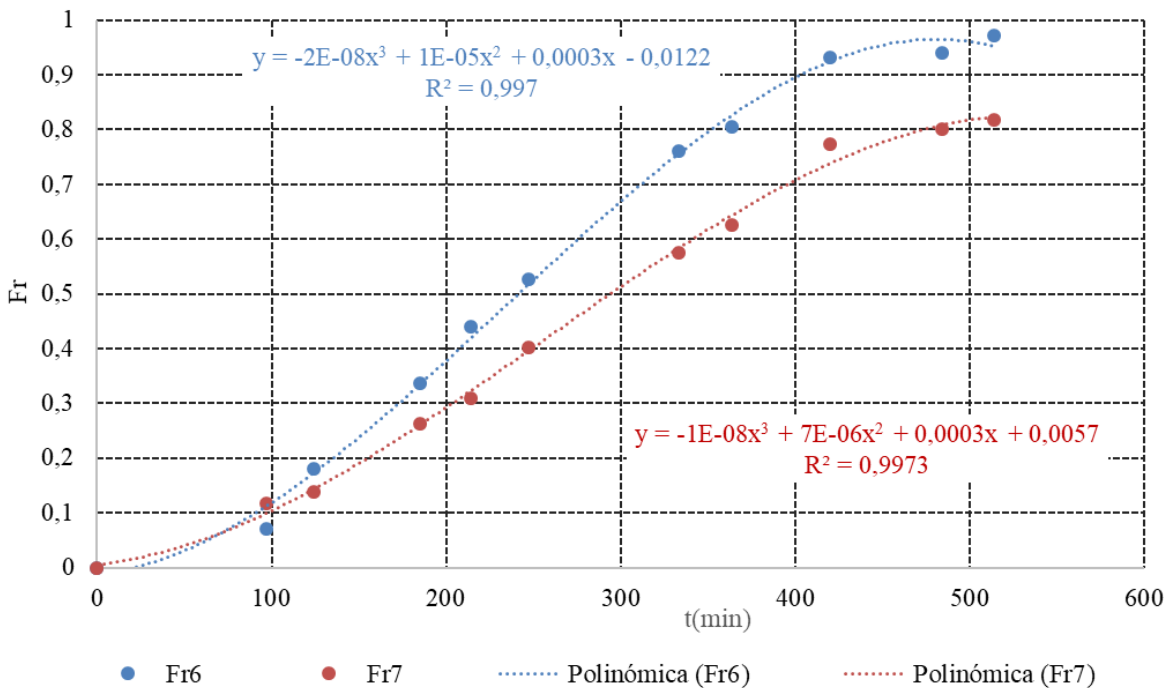


Figura 4.27: Evolución temporal de la fracción de líquido, modelos 6 y 7.

4.3.2.4. Conclusiones

De las experiencias realizadas y los resultados, de acuerdo a lo expuesto anteriormente, se puede afirmar que los efectos convectivos evolucionan más rápidamente en la zona del techo y la región central lo que provoca que las diferencias de temperaturas se atenúen por el movimiento de material de cambio de fase, en estado líquido, que asciende muy caliente sobre la pared calentada, circula por el techo y desciende por la pared fría pero también por la región central, mezclando el fluido. Esto hace que el material se funda más rápidamente en la región superior del recinto.

Para los modelos 6 y 7 en la zona cercana al techo la temperatura del material ya fundido se uniformiza entre las tres y las tres horas y media, en la zona central entre las cuatro y las cinco horas. En la zona cercana al piso los valores de temperatura evolucionan más lentamente, el material fundido uniformiza su temperatura después de las siete horas de iniciado el calentamiento (modelo 6).

Con respecto al espesor del recinto los valores de temperatura obtenidos en el techo para ambos modelos son muy cercanos, las diferencias se hacen apreciables en la zona central y en el piso. En la zona central si bien los valores son cercanos en ambos modelos ((T6(2,9) y T7(2,9)) y (T6(4,) y T7(4,9))), en el modelo 6 se intersecan T6(2,9) con T6(4,9) a las cuatro horas y media, mientras que en el modelo 7 esto se produce una hora después y con un valor de temperatura algo menor. En la zona cercana al piso, en el modelo 6 las temperaturas T6(2,0.5) y T6(4,0.5) se uniformizan a las siete horas, pero en el caso del modelo 7 esto no ocurre, ya que dadas las condiciones de las experiencias realizadas en este modelo todavía hay material en el estado sólido.

En cuanto a la visualización del proceso de fusión, se observa claramente el efecto convectivo, el que comienza a apreciarse a una hora y media de iniciado el calentamiento, siendo evidente al cabo de dos horas, como muestra la Figura 4.24.

Los registros fotográficos confirman que el flujo convectivo es bidimensional, ya que la frontera no presenta variación apreciable en la dirección z, además dicha interfase es definida y en principio se puede aproximar en forma lineal, solo de a tramos, ya que la pendiente cambia con la altura. En la zona del piso la capa fundida de material es muy pequeña y se mantiene prácticamente constante durante todo el proceso.

4.4. Bibliografía

1. Benard C.; Gobin D.; Martinez F. (1985). Melting in rectangular enclosures: experiments and numerical simulations. Journal Heat Transfer 107 (November).
2. Burmeister. (1983). "Convective heat transfer". J. Wiley & Sons. Kansas. EE. UU.
3. Hamdan, M y Al-Hinti, I. (2004). Analysis of Heat Transfer during the Melting of a Phase Change Material. Applied Thermal Engineering 24, 1935-1944.

4. Vilte M. y Bouciguez A. (2008). Determinación Experimental y Numérica de Propiedades Térmicas de Grasas Orgánicas Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Revista de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol.12, pág. 3.45 – 3.52. ISSN 0329-5184.
5. Vilte M. y Bouciguez A. (2010). Estudio experimental del efecto de convección en un recinto con material de cambio de fase. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Revista de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 14, pág. 03.199 -03.206. ISSN 0329-5184.
6. 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.
7. Vilte M., Bouciguez A. y Esteban S. (2013). Análisis de la transferencia térmica durante la fusión de un material de cambio de fase. Revista AVERMA (Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente). Revista de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente. ISSN 0329-5184.
8. Zhang Z.; Bejan A. (1989). Melting in an enclosure heated at constant rate. Int. Journal Heat Mass Transfer (32) (6).

Capítulo 5:

5. Comportamiento térmico y visualización del problema. Parte II

5.1. Visualización y análisis del frente de fusión. Modelos 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 y 10.

Se prosigue con el estudio del proceso de fusión del PCM, contenido en recipientes rectangulares de diferentes espesores que se encuentran térmicamente aislados y calentados en una de sus paredes laterales por un flujo de calor constante. Se analiza la influencia del espesor de la muestra, en el desarrollo de la transferencia conductiva y convectiva que se establecen en dicho proceso. Se suministra la misma potencia por unidad de masa a todos los recintos ensayados, con el objeto de que el tiempo total de fusión para todos los modelos sea aproximadamente el mismo (cuatro horas). Se registran imágenes y temperatura en función del tiempo a partir de las cuales se obtiene los diferentes perfiles del frente de fusión y la evolución temporal de la fracción de líquido. Para caracterizar los procesos conductivos y convectivos se analiza la rapidez de avance del frente de fusión en el borde superior y en la pared fría.

5.1.1. Dispositivo experimental

Las dimensiones de los recintos contenedores del PCM, así como la masa, potencia de calentamiento aplicada y relación de aspecto (H/L) se especifican en la tabla 5.1.

Modelo	Espesor (m)	Volumen (m ³)	Masa PCM (kg)	Potencia (W)	Potencia por unidad de área (W/m ²)	Potencia por unidad de masa (W/kg)	Relación de Aspecto
2	0,020	0,00043	0,380	14,81	685,65	38,10	0,11
3	0,030	0,00065	0,580	22,22	1028,70		0,17
4	0,040	0,00086	0,780	29,63	1371,76		0,22
5	0,050	0,0011	0,970	37,04	1714,81		0,28
6	0,060	0,0013	1,170	44,44	2057,4		0,33
7	0,070	0,0015	1,360	51,85	2400,46		0,39
8	0,080	0,0017	1,560	59,26	2743,52		0,44
10	0,100	0,0022	1,940	74,07	3429,17		0,56

Tabla 5.1: Información detallada de los modelos ensayados.

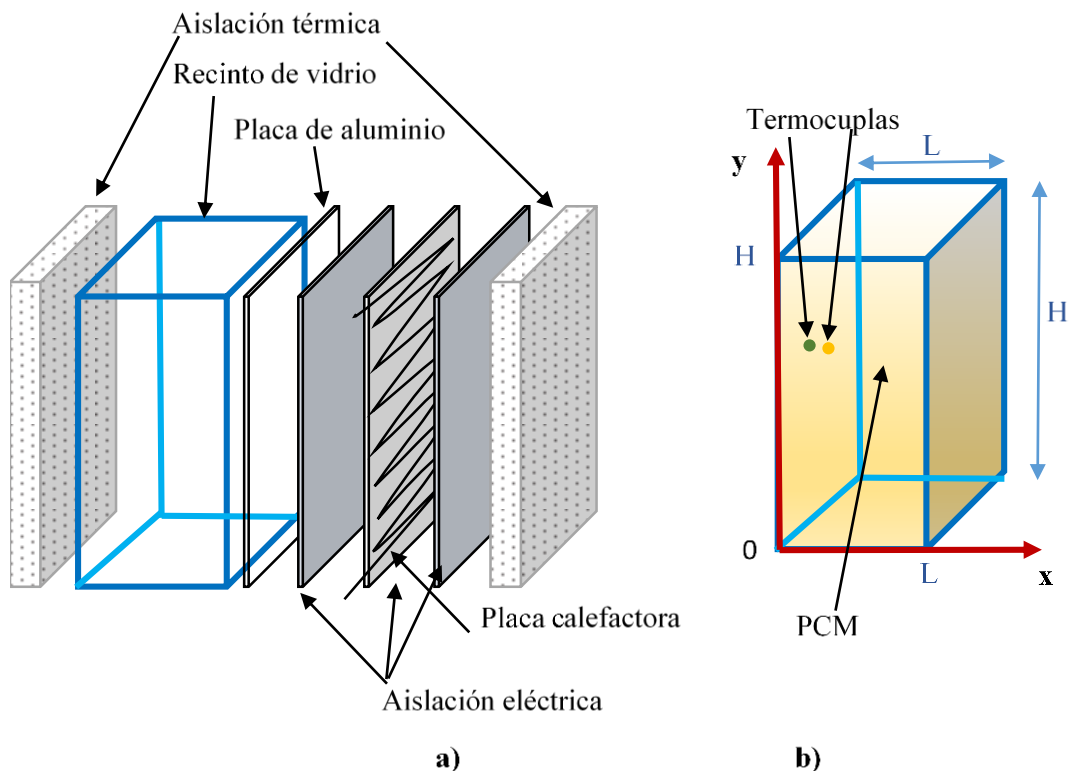


Figura 5.1: a) Partes del dispositivo experimental. b) Posición de las termocuplas y el sistema de referencia utilizado.

En la Figura 5.1 se muestra un esquema de un recinto con la resistencia eléctrica y la aislación térmica y eléctrica que se utilizaron en las experiencias. La pared calefactora (pared caliente) de todos los recintos, tiene adherida una placa de aluminio de 1 mm de espesor para uniformizar la temperatura. El devanado de la placa calefactora tiene una resistencia de 27Ω a temperatura ambiente.

El dispositivo experimental completo se muestra en la fotografía de la Figura 5.2. La cámara utilizada para el registro de las imágenes es una cámara CMOS, 8 bits monocroma marca HAYER, conectada a una notebook donde se almacenan para su posterior procesamiento. La medición de temperatura se realiza con termocuplas conectadas a un datalogger CR23X. Todas las experiencias se realizaron con la condición de igual potencia por unidad de masa aproximadamente de $38,1 \text{ W/kg}$ de PCM. El sistema recinto, placa calefactora y PCM se aísla con polietileno expandido de alta densidad de 2 cm de espesor.



Figura 5.2: Dispositivo experimental.

En el desarrollo de un experimento típico, se conecta la fuente de tensión a la placa calefactora y simultáneamente se registran las temperaturas de las termocuplas cada minuto y automáticamente una imagen cada 10 minutos. Cabe aclarar que las termocuplas han sido colocadas en el centro de las superficies interna (T_{in}) y externa (T_{ex}) de la pared caliente como se observa en la Figura 5.1 b).

En todos los modelos se trabaja con una pared lateral con condición de flujo de calor constante y las demás paredes aisladas.

5.1.2. Resultados Obtenidos

Las imágenes registradas, se procesan recortándolas al tamaño del recinto contenedor del PCM, y aplicando la conocida técnica de binarización. Para ello se selecciona, a partir del histograma, un nivel de gris umbral. Éste puede variar de acuerdo a la iluminación, el tamaño de las muestras y al contraste entre la apariencia de la sustancia sólida y la líquida. En la Figura 5.3 se muestra, a modo de ejemplo, un registro fotográfico original y una imagen binarizada.



Figura 5.3: a) Imagen original y b) imagen binarizada.

Por una razón de capacidad de almacenamiento de imágenes, resulta necesario reducir la resolución original de las imágenes, lo que introduce ruido indeseado en la definición de los perfiles (figura 5.3 b), por lo que previo a la binarización, se realiza un suavizado tomando para cada pixel en la imagen el valor rms de una ventana de 7x7 pixeles. A partir de todas las imágenes binarizadas se obtiene la información del perfil que separa la fracción sólida y líquida, interfaz, de la muestra. El algoritmo desarrollado a tal fin, devuelve los valores de la fracción de líquido presente, los valores de las coordenadas x,y de los perfiles del avance del frente de fusión y las gráficas con la reconstrucción de los perfiles en función del tiempo.

5.1.2.1. Evolución temporal del Frente de Fusión

En la figura 5.4 se muestran los perfiles de la frontera para cada muestra. Se observa que a medida que el espesor aumenta, los perfiles son más suaves y definidos. Para pequeños espesores como el de 3 cm, los perfiles tienen pequeñas variaciones bruscas que le dan una apariencia quebrada. En estos casos, las fotografías revelan una frontera menos definida, consecuencia de un calentamiento más uniforme de toda la muestra durante la etapa de conducción pura y transición a la convección. En las etapas mencionadas la concavidad del perfil es hacia arriba, una vez que la interface llega al extremo superior derecho (pared fría) se invierte la concavidad hacia abajo. El número de perfiles visualizados para cada uno de los espesores es un indicativo de la duración de la etapa puramente convectiva. Para las cavidades de menor espesor, la etapa tiene una menor duración que para las cavidades de mayor espesor, como se desprende de la cantidad de perfiles de avance de la frontera (Figuras 5.4 a), b), c), d) y e)).

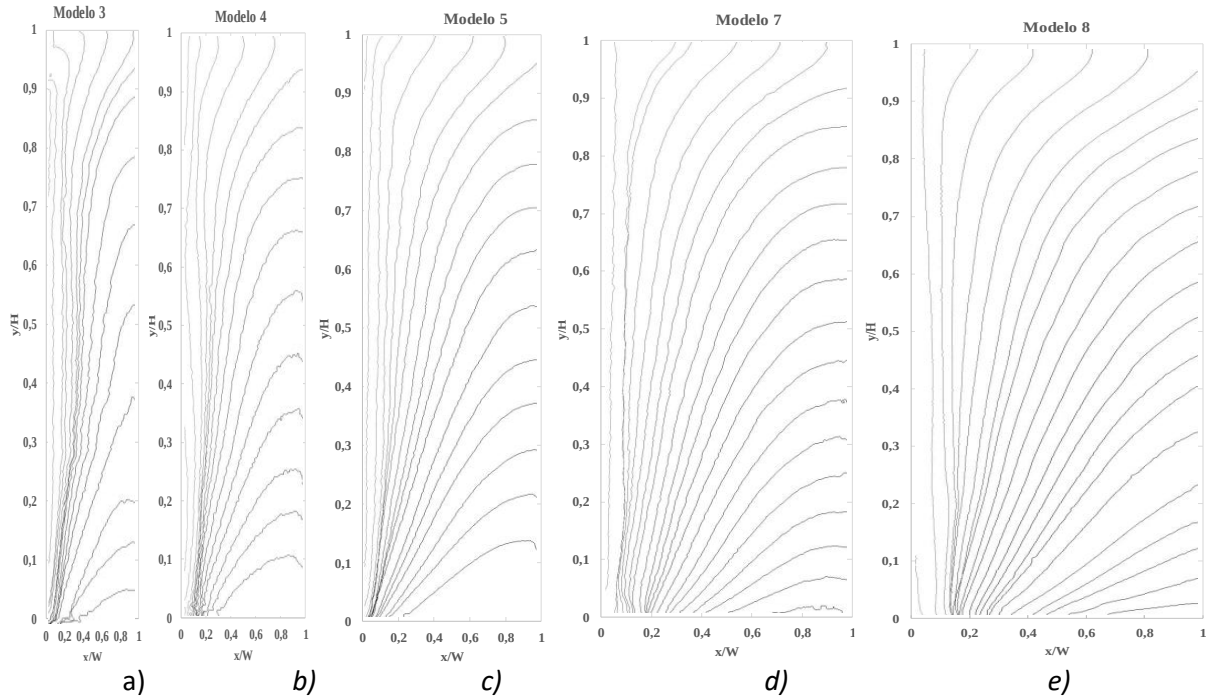


Figura 5.4: Evolución temporal de los perfiles de la interface.

Finalmente, este estudio confirma que los perfiles en general no son lineales como se analizó en trabajos anteriores (Hamdan y Al-Hinti, 2004; Vilte M., 2011; Vilte M, 2013).

5.1.2.2. Rapidez del frente de fusión.

Con los valores de las posiciones y tiempo (x , y , t) obtenidos, se puede analizar el avance horizontal x sobre la pared superior haciendo $y = H$, para distintos tiempos. En la figura 5.5 se grafican estos valores para los modelos 2, 3, 4 y 5 y en la figura 5.6 para los modelos 6, 7, 8 y 10.

Se observa que el fenómeno de conducción pura y el de transición a la convección tienen un periodo más largo para los modelos de menor espesor. Desde el inicio del calentamiento hasta que el frente de fusión alcanza la esquina superior derecha transcurren entre ciento cuarenta y ciento cincuenta minutos para el modelo 2, disminuyendo paulatinamente a medida que el espesor aumenta. Para el modelo 10, el tiempo estimado es entre setenta y ochenta minutos. También se puede apreciar que para las muestras de menor espesor (modelos 2 y 3), el avance de la frontera en x , arranca entre los ochenta y cien minutos de iniciado el calentamiento, por lo que la etapa puramente conductiva también tiene una mayor duración para los modelos de menor espesor. La rapidez del frente de fusión sobre la pared superior en la etapa de la transición se puede estimar linealizando los valores de x en función del tiempo en esa etapa. Esta rapidez oscila entre $0,016 \text{ min}^{-1}$ y $0,028 \text{ min}^{-1}$ para los distintos modelos y es levemente superior en los modelos de 2 y 3 de menor espesor.

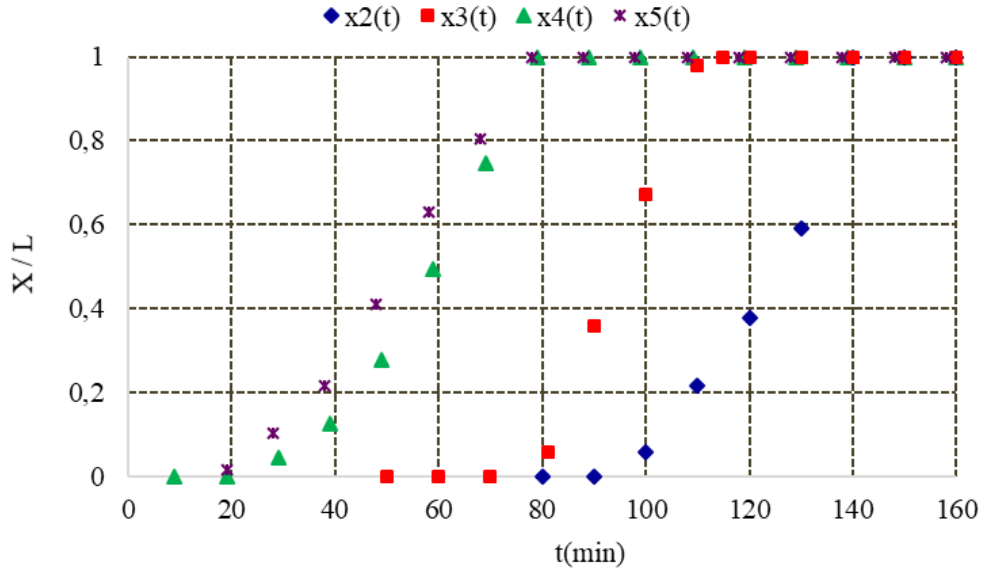


Figura 5.5: Evolución temporal del frente de fusión en la pared superior. Modelos 2, 3, 4 y 5.

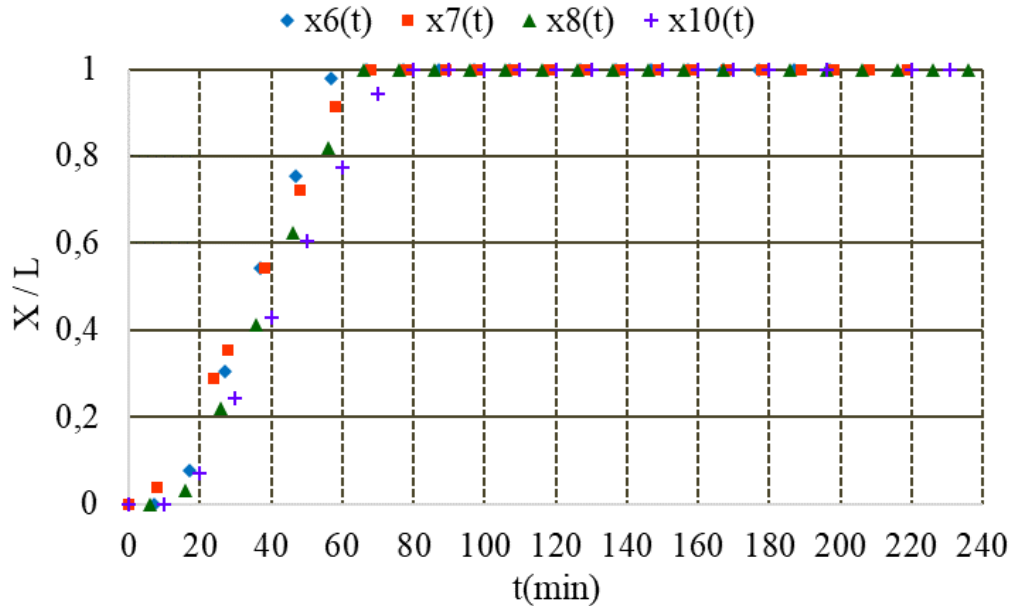


Figura 5.6: Evolución temporal del frente de fusión en la pared superior. Modelos 6, 7, 8 y 10.

De los valores numéricos de los perfiles se puede determinar el tiempo que tarda el frente de fusión (t_f) en alcanzar la esquina superior de la pared opuesta (figuras 5.5 y 5.6) más fría, que marca el inicio de la etapa puramente convectiva, y la cantidad de sustancia fundida durante este tiempo. En la Tabla 5.2, se muestran los valores de estos parámetros; el tiempo calculado como promedio ponderado en la columna 3 y la fracción de sustancia fundida para este tiempo en la columna 4. Otro tiempo característico del proceso y que en algunos casos

(Hamad et al, 2017) es empleado para determinar el número de Fourier, el que caracteriza la transferencia de calor en la etapa de la transición, es el tiempo necesario para fundir el 40% de la muestra ($t_{40\%}$), este tiempo se estimó para todos los modelos y se muestra en la columna 5 de la tabla ya mencionada. Se advierte que ambos tiempos t_f y $t_{40\%}$ son próximos. En general, para todas las muestras cuando el frente de fusión alcanza la esquina superior de la pared más fría, la cantidad de PCM fundido es algo inferior al 40%, también se observa una tendencia decreciente con el aumento del espesor para los valores de t_f .

Modelo	Relación de aspecto	t_f (min)	Fracción fundida para t_f	$t_{40\%}$ (min)	Rapidez del frente de fusión en la pared superior (min^{-1})
2	0.11	135	0.35	140	0.022
3	0.17	110	0.36	115	0.028
4	0.22	74	0.31	86	0.019
5	0.28	73	0.31	85	0.017
6	0,33	57	0.31	69	0.019
7	0.39	61	0.32	73	0.016
8	0.44	62	0.35	69	0.019
10	0.56	72	0.36	77	0.016

Tabla 5.2: Tiempos característicos del proceso de fusión y rapidez de avance en la etapa convectiva.

Analizando los valores de posición y tiempo (x , y , t) de los perfiles del frente de fusión sobre la pared más fría opuesta a la superficie calentada, esto es para $x = L$, se puede determinar la rapidez del avance sobre la misma y que corresponde a la etapa puramente convectiva. En la figura 5.7 se grafican estos valores para los modelos 2, 3, 4 y 5 y en la figura 5.8 para los modelos 6, 7, 8 y 10.

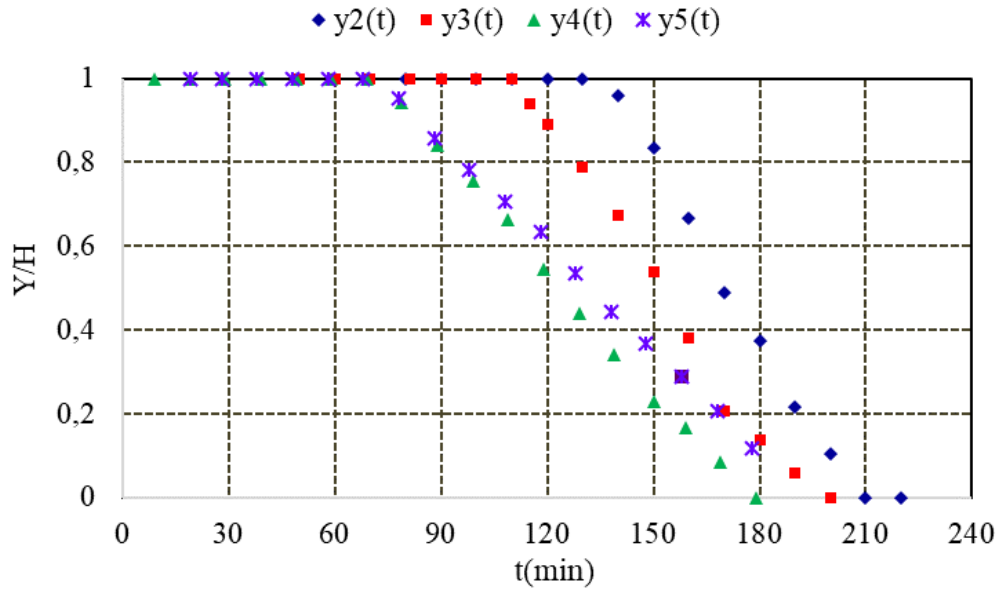


Figura 5.7: Evolución temporal del frente de fusión en la pared fría, modelos 2, 3, 4 y 5.

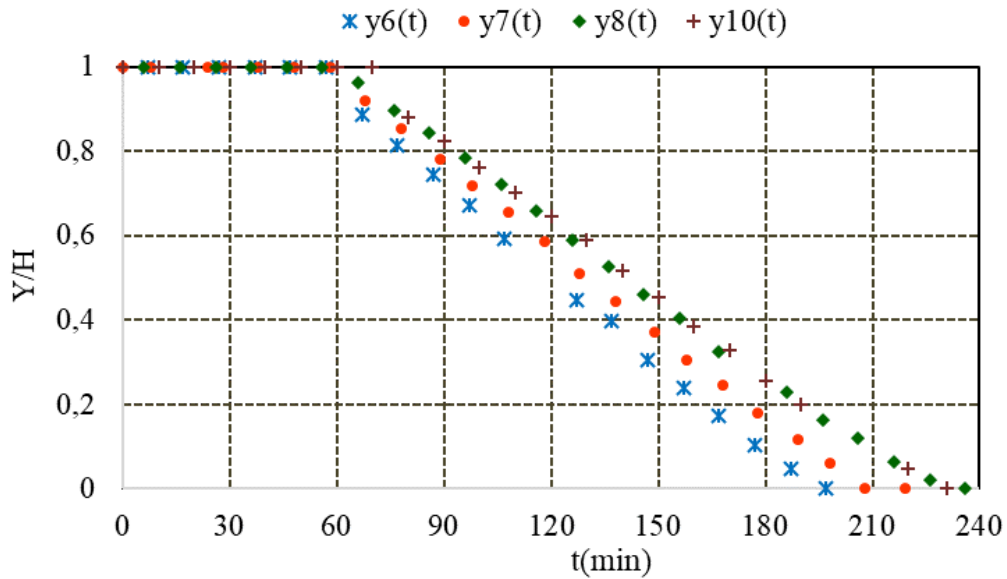


Figura 5.8: Evolución temporal del frente de fusión en la pared fría, modelos 6, 7, 8 y 10.

De las gráficas 5.7 y 5.8 se puede inferir que la rapidez del frente de fusión sobre la pared fría depende del espesor de la muestra, la rapidez de avance es mayor para los recintos de menor espesor disminuyendo a medida que el espesor aumenta como se muestra en la columna 6 de la Tabla 5.2.

Finalmente, de las figuras 5.5, 5.6, 5.7 y 5.8 se advierte que al proceso de fusión de toda la masa encerrada en las cavidades le toma un tiempo que varía entre tres horas y media y cuatro

horas, lo que está de acuerdo con la condición de que la potencia por unidad de masa aplicada en todas las muestras es la misma.

5.1.2.3. Evolución temporal de la Fracción de Líquido

La evolución temporal de la fracción de líquido desde el inicio del calentamiento hasta que se funde toda la sustancia, se muestra en la figura 5.9 para todas las muestras ensayadas, con la misma potencia por unidad de masa aplicada.

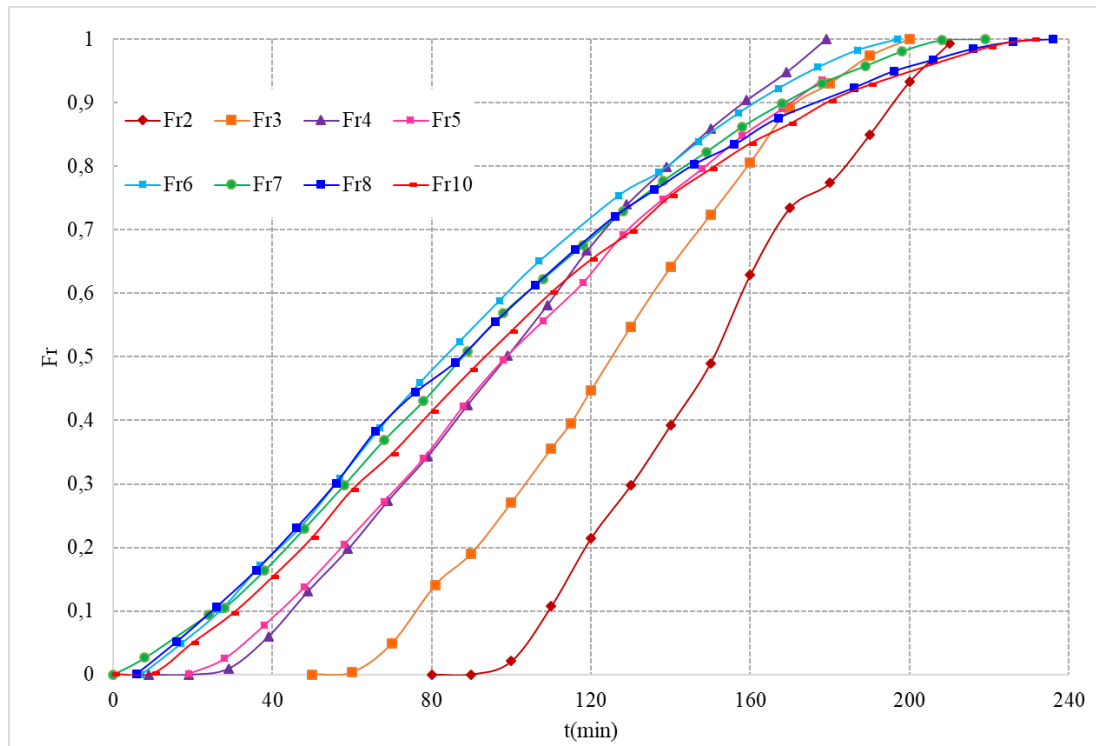


Figura 5.9: Fracción de líquido en función del tiempo.

En esta figura, se pueden apreciar las diferencias entre las muestras de menor espesor (0.02, 0.03, 0.04 y 0.05 m) y las de mayor espesor (0.06, 0.07, 0.08 y 0.10 m) en lo referido a los tiempos de arranque del proceso de fusión y a la rapidez del avance del frente de fusión. Se puede observar que las muestras de menor espesor comienzan más tarde el proceso de fusión. Mientras que en las etapas de transición a la convección y puramente convectiva presentan una mayor rapidez, lo que se desprende de las diferentes pendientes de la evolución temporal de las fracciones líquidas consideradas. En las muestras de mayor espesor la fracción de líquido crece con el tiempo con valores muy próximos entre sí, con variaciones que no superan el 5%. A tiempos mayores que ciento veinte minutos y cuando se ha fundido alrededor del 70% de la sustancia, los valores de la fracción líquida de los modelos 4 y 5 se aproximan a los de mayor espesor; los del modelo 3 a los ciento setenta minutos, cuando la fracción líquida es del 80%, finalmente los del modelo 2 a los doscientos minutos cuando la masa fundida es del 93 %.

5.1.3. Conclusiones

La observación detallada de los registros fotográficos y la reconstrucción de los perfiles del avance de frente de fusión, revelan que las muestras de menor espesor, presentan perfiles de apariencia quebrada o con pequeñas variaciones que sugieren una frontera menos definida, mientras que las muestras de mayor espesor exhiben perfiles más suaves. En los modelos de menor espesor se observa que tardan más tiempo en comenzar el proceso de fusión, esto es, presentan una etapa puramente conductiva más prolongada, cercana a una hora y media. Por otro lado, la etapa convectiva, hasta que termina de fundirse toda la sustancia, requiere menor tiempo.

Se determina la rapidez de avance de la frontera en la pared superior que varía entre $2,67 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ y $4,67 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$, lo que corresponde a la etapa de transición entre la conducción y la convección. Con respecto a la rapidez de avance de la interface sobre la pared fría se infiere que depende del espesor de la muestra siendo mayor para los recintos de menor espesor y disminuyendo a medida que el espesor aumenta.

Se obtiene la evolución temporal de la fracción de líquido para todas muestras ensayadas y que corresponden a diferentes relaciones de aspecto; se plantea a futuro correlacionar dichos valores con algún parámetro térmico como la temperatura en la superficie interna de la pared del recinto con condición de flujo de calor constante.

5.2. Variación de la altura: Modelo 1 (25 cm de altura) y Modelo 2 (30 cm de altura)

En vistas a estudiar con mayor detalle el perfil térmico durante el proceso de fusión, se realiza un estudio detallado de la distribución de temperaturas. Se evalúan los gradientes verticales y horizontales que se establecen en el interior del recinto. Dichos gradientes son los responsables del establecimiento y desarrollo de la transferencia de calor convectiva y conductiva dentro de la cavidad. Se analiza la influencia de la altura del recinto en el desarrollo del flujo convectivo, así como la forma y rapidez del frente de fusión. Además, se determina la evolución temporal de la fracción de líquido a partir de los registros fotográficos del proceso. (Vilte M. et al, 2014). Se construyen dos recintos de vidrio: modelo 1 y modelo 2. Las resistencias usadas son construidas para dichos recintos con las medidas especificadas de $25 \times 12 \text{ cm}^2$ y $30 \times 12 \text{ cm}^2$, los valores de las mismas son de 138 y 173 Ohmios, respectivamente. Las potencias de calentamiento en las experiencias están en el intervalo entre 17 y 21 W. Para realizar las medidas térmicas se emplean 16 termocuplas tipo T anexadas a módulos ADAM que conectados a una PC permiten registrar y guardar los datos para el posterior procesamiento.

5.2.1. Dispositivo experimental

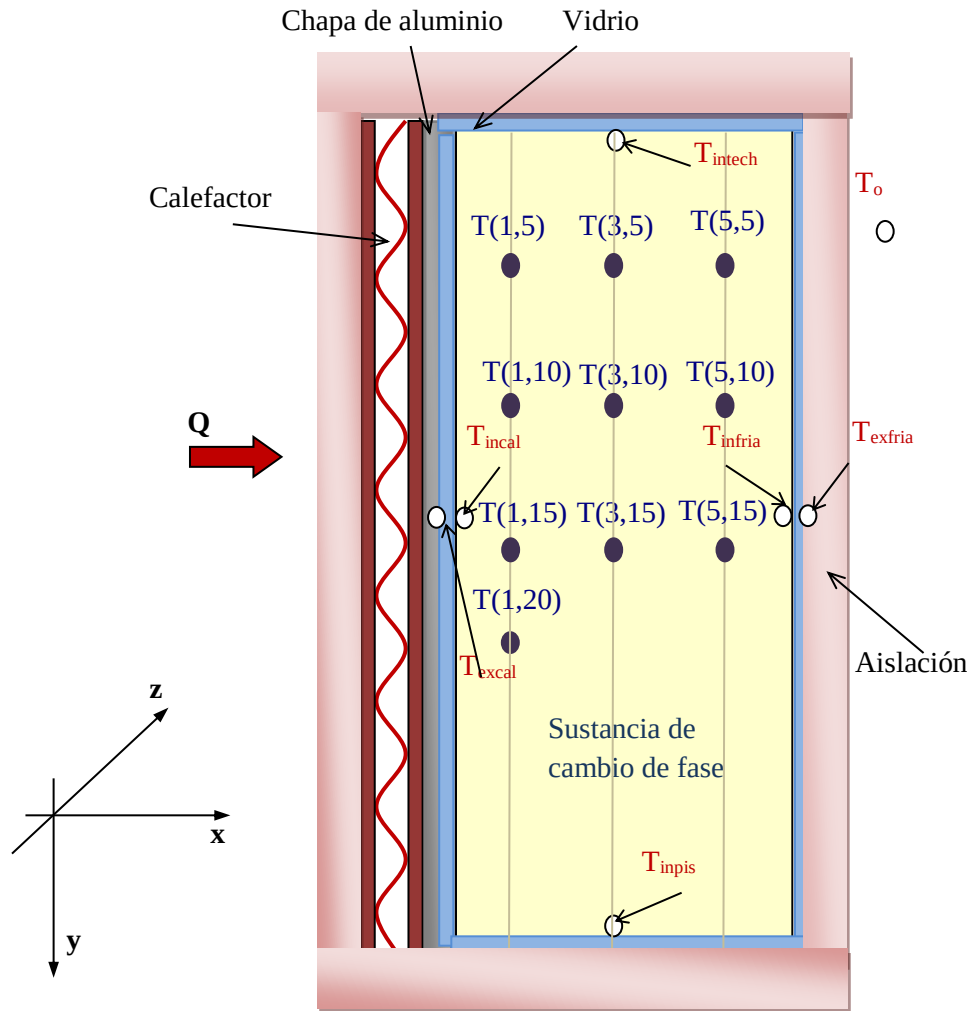


Figura 5.10: Ubicación de los sensores térmicos y la dirección del flujo de calor.

En la figura 5.10 se muestra un esquema del equipo experimental utilizado, la notación usada en el análisis de las medidas térmicas y las posiciones de las termocuplas. En la tabla 5.3 se especifica información detallada que complementa la suministrada por la figura mencionada.

Para la visualización del proceso se empleó una cámara fotográfica de alta resolución y se realizaron registros fotográficos cada quince minutos. Luego se procesaron las fotos con el software Picasa y posteriormente con ImageJ, para estimar la fracción de líquido presente en función del tiempo.

Modelo	Dimensión (cm ³)	Altura (cm)	Volumen (m ³)	Potencia Aplicada	Sensores en el interior de la sustancia $T_i(x,y)_r$
1	6x12x25	25	0,0018	17.5 W	T(1, 5), T(1,10), T(1, 15), T(1,20)
				22 W	T(3, 5), T(3, 10), T(3, 15) T(5, 5), T(5, 10), T(5, 15)
2	6x12x30	30	0,0022	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 la pared calentada			T_{incal} , T_{excal}		
Sensores en la pared fría			T_{infria} , T_{exfria}		
Sensor en la pared inferior			T_{inpis}		

Tabla .5.3: Información detallada de los modelos 1 y 2 ensayados.

5.2.2. Resultados obtenidos

5.2.2.1. Medidas térmicas

Para estudiar térmicamente y obtener imágenes del proceso de fusión de la sustancia de cambio de fase se llevan a cabo numerosas experiencias de calentamiento y enfriamiento de la sustancia en un laboratorio donde la temperatura ambiente puede variar entre 16 y 20 °C. El sistema formado por el material de cambio de fase, recinto y calefactor están aislados térmicamente del ambiente.

En la figura 5.11 se presenta la evolución temporal de las temperaturas en las paredes del modelo 2, se puede observar que la etapa de calentamiento dura aproximadamente seis horas. La temperatura de la superficie interior del piso alcanza los 37°C, por lo que, en este ensayo, casi toda la sustancia a las seis horas de calentamiento está prácticamente líquida.

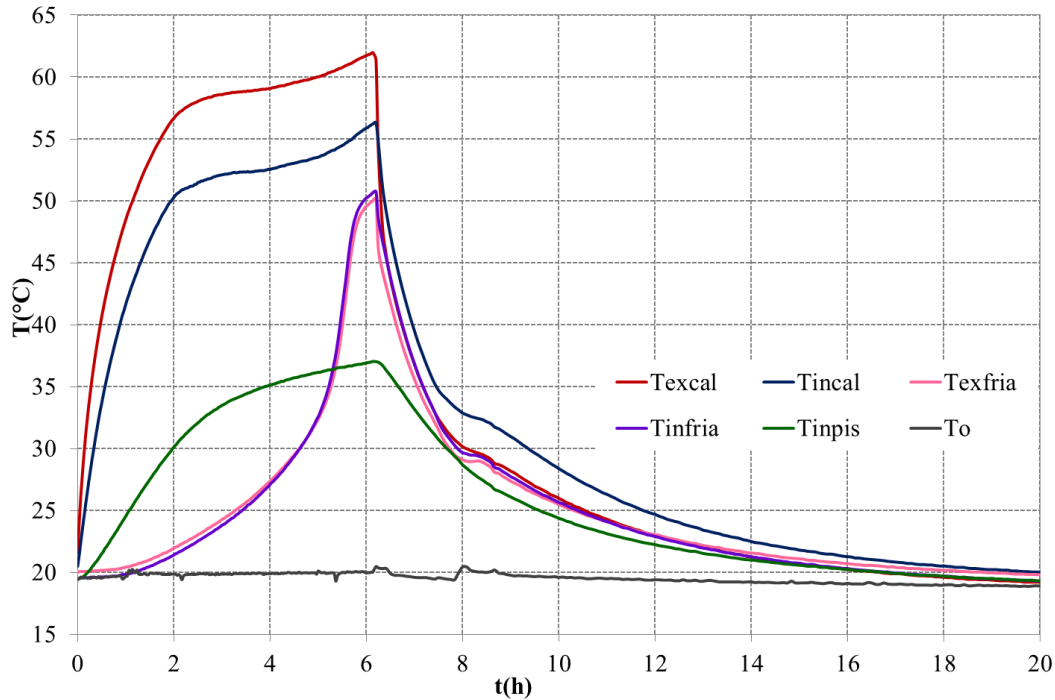


Figura 5.11: Evolución temporal de temperaturas en las paredes del modelo 2.

En las figuras 5.12, 5.13 y 5.14 se presenta la evolución temporal de temperaturas verticales en el interior del modelo 2, 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 donde los perfiles crecen rápidamente con el tiempo, con disminución de pendientes a medida se alejan de la pared superior. Una vez que la sustancia se funde ($T_F = 37^\circ\text{C}$) todos los perfiles experimentan un cambio de pendiente que provocan una separación de los mismos (segunda etapa). En una tercera etapa los perfiles continúan creciendo (más lentamente) y guardan entre si diferencias de temperatura prácticamente constantes hasta finalizar la etapa de calentamiento. Esta etapa 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 en la región superior ($y \leq 15$) se alcanzan temperaturas superiores a 50°C , lo que da cuenta que el material de cambio de fase se encuentra en estado líquido. En todas las gráficas mencionadas durante la etapa de enfriamiento, se observa el fenómeno de sub-enfriamiento, pero es más notable en la figura 5.13 que corresponde a los perfiles de temperatura $T(3, y)$ cerca de la región central, a igual distancia de la pared calentada y la pared opuesta más fría.

En la figura 5.12 se puede observar que, al comienzo de la experiencia (etapas 1 y 2), los perfiles de temperaturas cercanos a la pared caliente: $T(1, 5)$, $T(1, 10)$ y $T(1, 15)$, son cóncavos siguiendo la forma del perfil de temperatura de la superficie interior de la pared caliente: T_{incal} (figura 5.11).

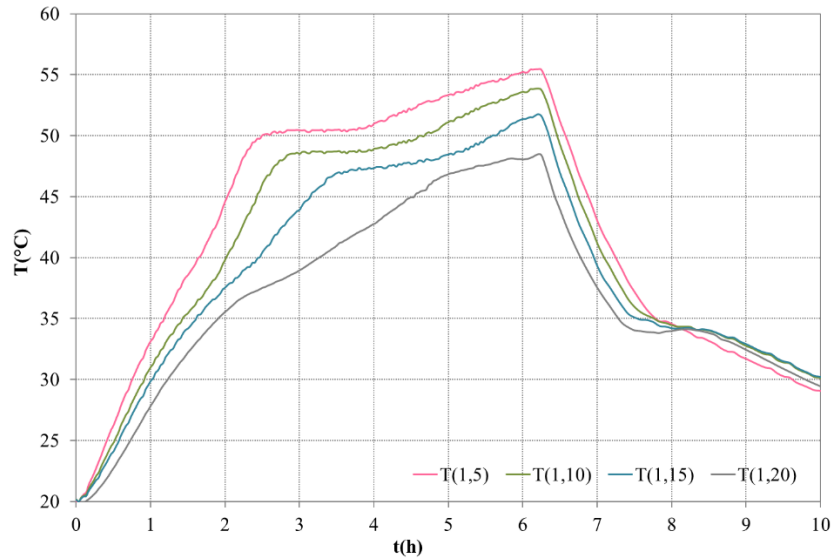


Figura 5.12: Evolución temporal de temperaturas, cerca de la pared calentada, $x=1$ cm.

La figura 5.13 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 estos perfiles son convexos, similares al observado en la pared fría: $T_{\text{fría}}$ (figura 5.11).

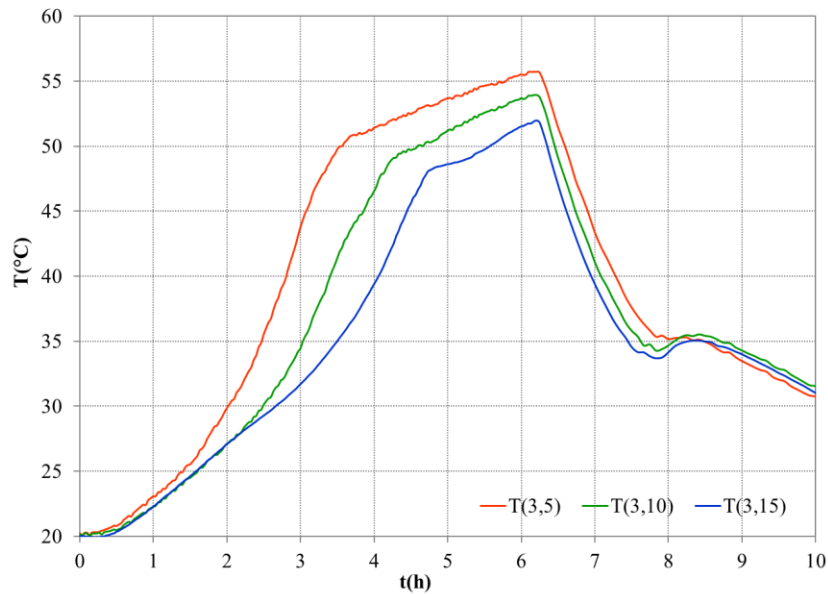


Figura 5.13: Evolución temporal de temperaturas en un plano vertical en el centro del recinto.

En la figura 5.14 se puede visualizar que en la segunda etapa de calentamiento se establecen grandes diferencias de temperatura. La tercera etapa del calentamiento comienza cuando los

tres perfiles superan los 50° C, esto se produce a diferentes tiempos entre las cuatro y cinco horas y media de iniciado el calentamiento.

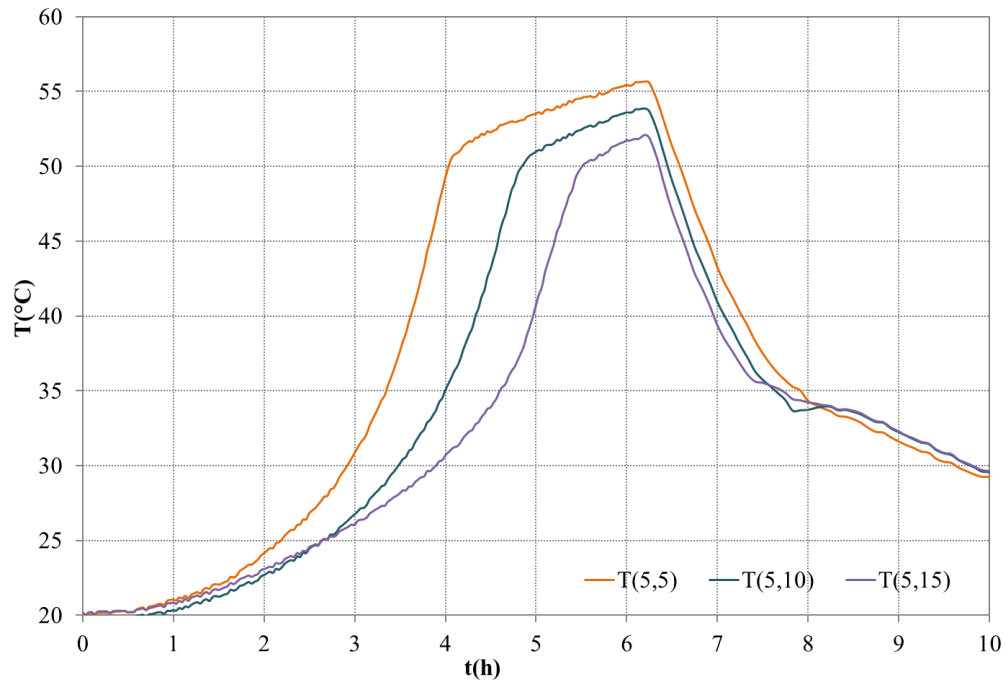


Figura 5.14: Evolución temporal de temperaturas, cerca de la pared fría, $x=5$ cm.

En las figuras 5.15, 5.16 y 5.17 se presenta la evolución temporal de temperaturas horizontales en el interior del recinto 2, a diferentes posiciones verticales: $T(x, 5)$, $T(x, 10)$ y $T(x, 15)$. En cada una de las figuras se puede observar, en la etapa de calentamiento, los diferentes tiempos para los cuales se uniformiza la temperatura ($T(1,y)=T(3,y)=T(5,y)$).

En la región superior (figura 5.15) a las cuatro horas de iniciado el calentamiento los perfiles de temperatura alcanzan valores algo superiores a los 50°C y siguen creciendo yuxtapuestos y la sustancia ya está completamente líquida.

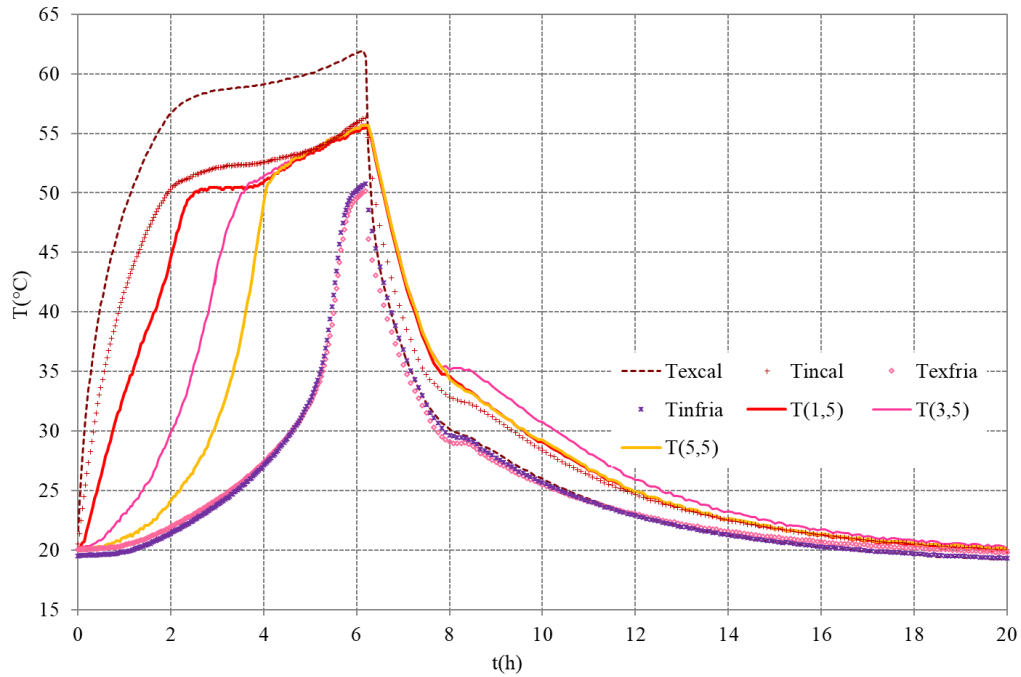


Figura 5.15: Evolución temporal de temperaturas, cerca de la pared superior, $y=5$ cm.

En el plano horizontal a 10 cm de la pared superior (figura 5.16), la unificación de los valores de temperatura ocurre entre las cuatro y cinco horas con valores muy próximos a los 50°C.

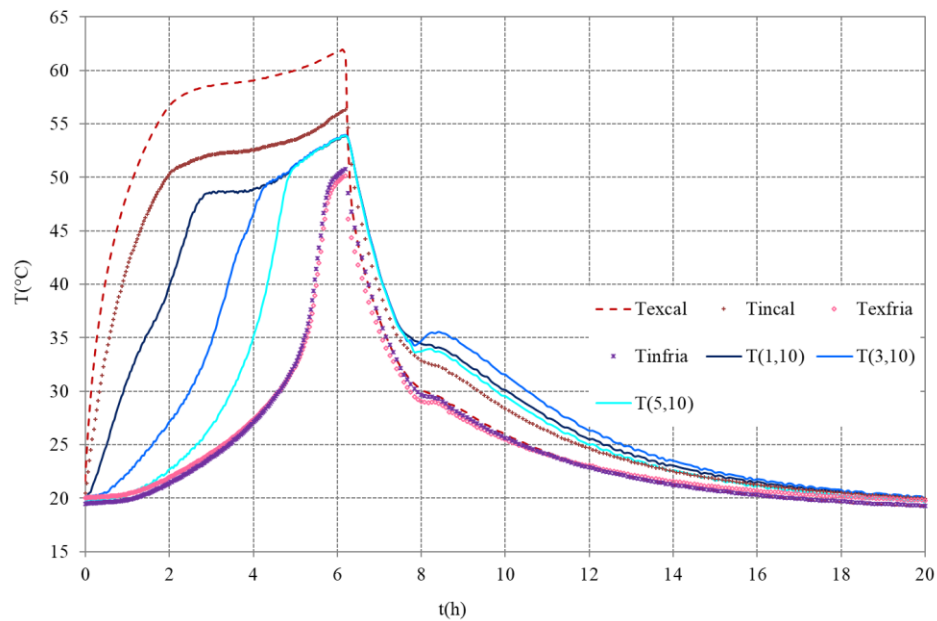


Figura 5.16: Evolución temporal de temperaturas en un plano horizontal a 10 cm de la pared superior.

Finalmente, en el plano horizontal que pasa por el centro del recinto, (figura 5.17) los valores de temperatura se uniformizan entre las cuatro horas y media y cinco horas y media, con valores por debajo de los 50°C.

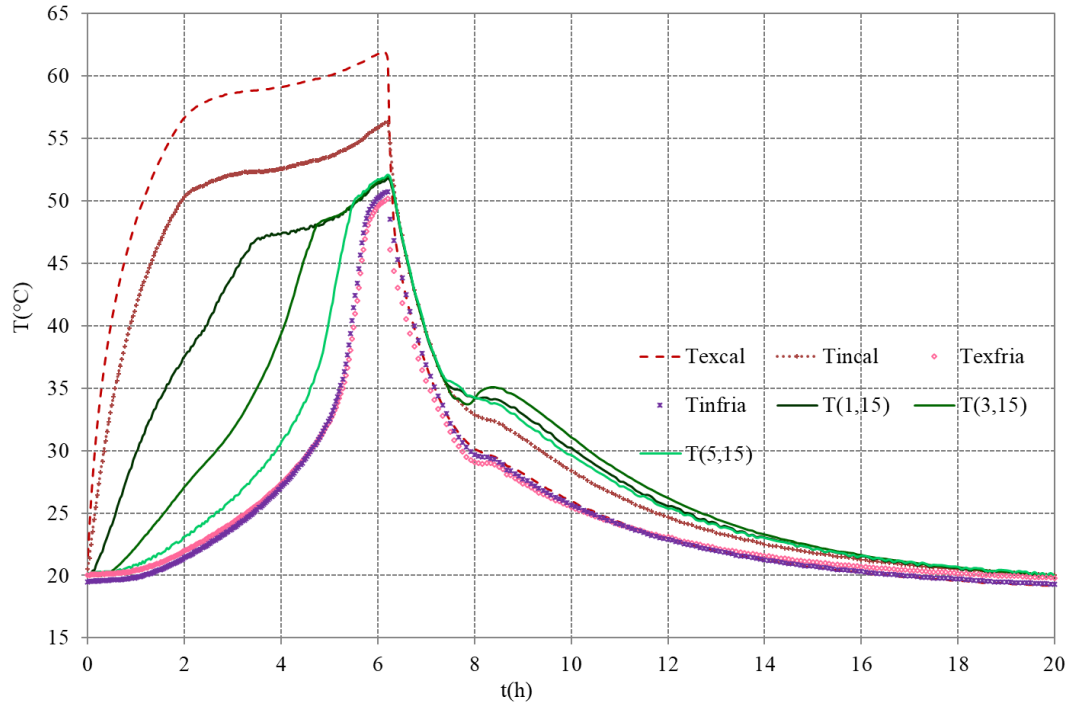


Figura 5.17: Evolución temporal de temperaturas en un plano horizontal en el centro del recinto.

5.2.2.2. Fenómeno de sub-enfriamiento en la grasa orgánica estudiada

En la etapa de enfriamiento, entre las siete y ocho horas, se observa, para todos los perfiles de la figura 5.13, el fenómeno de sub-enfriamiento; para analizarlo se muestra en la figura 5.18 solamente el perfil T (3,15) que corresponde a la temperatura de la sustancia en el centro del recinto.

En la zona de enfriamiento, se pueden distinguir dos etapas: la primera donde la sustancia se enfría en el estado líquido y la segunda, después de la solidificación. El fenómeno de sub-enfriamiento está representado por una inflexión que forma un valle después de la primera etapa, en esta depresión la sustancia alcanza temperaturas por debajo del punto de solidificación, sin que realmente esté sólida. Posteriormente ocurre un aumento de la temperatura hasta alcanzar la temperatura de solidificación y luego el material, ya sólido, continúa enfriándose en forma normal.

Este fenómeno permite determinar el punto de solidificación de la sustancia (T_c), que, en este caso, es de aproximadamente 35,06 °C, como se indica en la misma figura. Si la sustancia

fuera pura coincidiría con el punto de fusión, en este caso los resultados muestran que no es así, ya que la sustancia estudiada no es pura; sin embargo, es de esperar que T_c que se encuentre dentro de un intervalo alrededor de la temperatura de fusión de la sustancia.

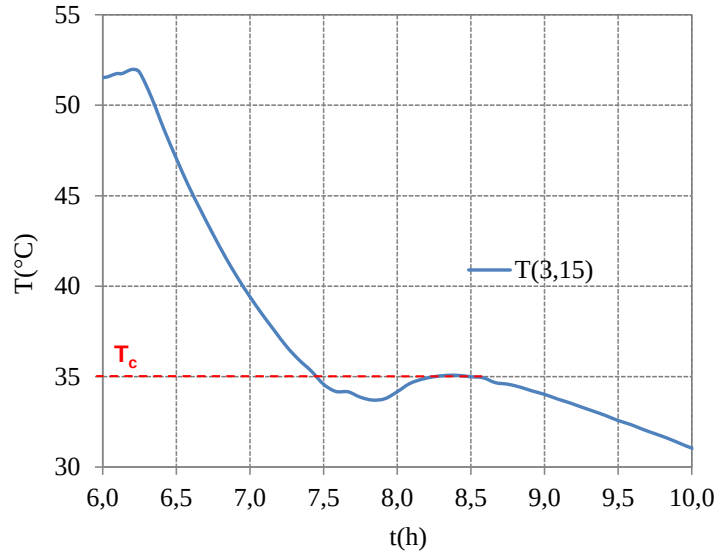


Figura 5.18: Fenómeno de sub-enfriamiento en la sustancia de cambio de fase.

5.2.2.3. Gradientes de temperaturas

Se determinan los gradientes horizontales de temperaturas G_x para las posiciones $x=1$ ($x_i=1$, $x_{i+1}=3$) y $x=3$ cm ($x_i=3$, $x_{i+1}=5$); a distintas alturas del recinto 2, $y=5$, 10, 15 cm, a través de la siguiente expresión:

$$G_x = \frac{T(x_{i+1}, y) - T(x_i, y)}{x_{i+1} - x_i} \quad (5.1)$$

Se calculan los valores de los gradientes de temperaturas verticales G_y en $y=5$ ($y_i=5$, $y_{i+1}=10$), $y=10$ ($y_i=10$, $y_{i+1}=15$) y en $y=15$ cm ($y_i=15$, $y_{i+1}=20$) a 1 cm de la pared caliente, equidistante de la pared caliente y la pared opuesta más fría ($x=3$ cm) y cercano a pared fría ($x=5$ cm) usando la expresión:

$$G_y = \frac{T(x, y_{i+1}) - T(x, y_i)}{y_{i+1} - y_i} \quad (5.2)$$

Donde $T(x_i, y)$ y $T(x, y_i)$ son las temperaturas registradas experimentalmente cada dos minutos, por lo que puede obtenerse una evolución en el tiempo de los gradientes de temperaturas que se establecen en el interior de los recintos.

5.2.2.3.1. Gradientes horizontales

La figura 5.19 muestra los gradientes horizontales, en la región superior ($y=5$ cm). Se advierte que cerca de la pared calentada $G_x(1,5)$, crece desde el inicio del calentamiento y alcanza un valor máximo, a las dos horas de iniciado el mismo; luego comienza a disminuir rápidamente, en tanto que el gradiente en región central $G_x(3,5)$, tiene igual comportamiento, pero con una diferencia de tiempo de aproximadamente una hora. En la misma figura, se puede notar que mientras $G_x(1,5)$ alcanza el máximo $G_x(3,5)$ llega a un poco más de la mitad de su máximo valor y cuando $G_x(1,5)$ ha disminuido a las tres cuartas partes de su valor máximo, $G_x(3,5)$ alcanza el valor máximo.

A las cuatro horas de iniciado el calentamiento ambos gradientes de temperatura analizados son despreciables y puede decirse que en la zona central y la cercana a la pared caliente a 5 cm del techo se ha uniformizado la temperatura. Esto está de acuerdo con los registros fotográficos (figura 5.26) que muestran que a las tres horas de iniciado el calentamiento el frente de fusión alcanza la esquina superior derecha, dando lugar a un flujo convectivo totalmente desarrollado en la región superior de la cavidad, donde crece más rápidamente la fracción de líquido presente en la zona.

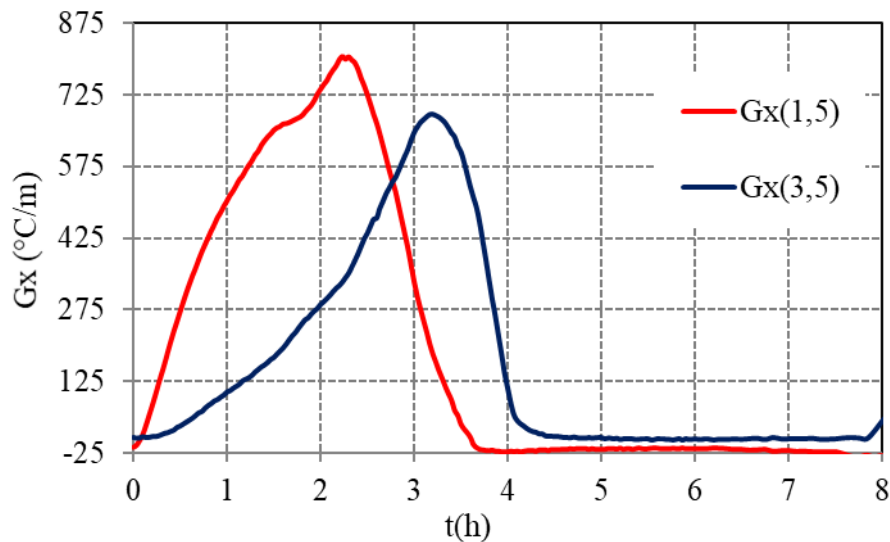


Figura 5.19: Gradientes de temperaturas horizontales a $y=5$ cm.

De la figura 5.20 se puede ver que, a medida que la altura disminuye esta rapidez disminuye, decir que los gradientes de temperatura crecen pero más lentamente, así a $y=10$ cm del techo $G_x(1,10)$ alcanza un valor máximo las dos horas y media de iniciado el calentamiento y luego comienza a disminuir, en tanto que el gradiente $G_x(3,10)$ tiene igual comportamiento pero con una diferencia de tiempo de una hora. A las cuatro horas y media de iniciado el calentamiento ambos gradientes de temperatura son despreciables y puede decirse que en la zona central y la

cercana a la pared caliente a 10 cm del techo se ha uniformizado la temperatura, esto está de acuerdo con los registros fotográficos (figura 5.26) que muestran que a esta hora en esta zona la sustancia está líquida.

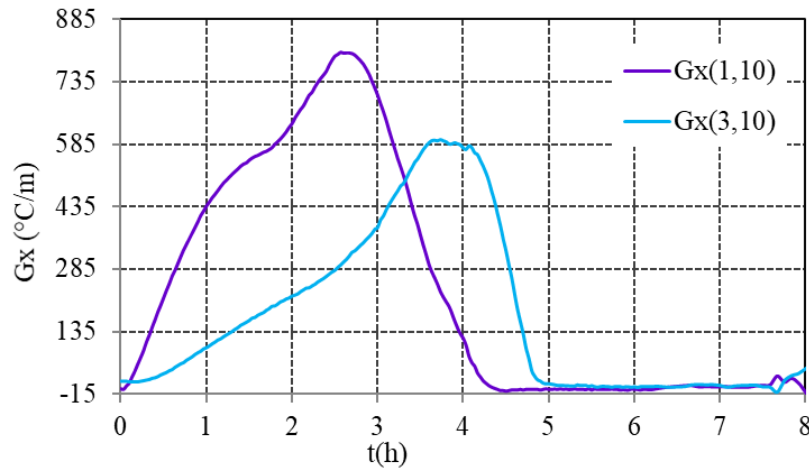


Figura 5.20: Gradientes de temperaturas horizontales a $y=10$ cm.

Por último, la figura 5.21 muestra los gradientes horizontales a mitad del recinto ($y=15$), adyacente a la pared calentada $G_x(1,15)$ y en el centro $G_x(3,15)$. Se observa que $G_x(1,15)$ crece desde el inicio del calentamiento y alcanza un valor máximo pasadas las tres horas de iniciado el calentamiento y luego comienza a disminuir, en tanto que $G_x(3,15)$, tiene igual comportamiento, pero con una diferencia de tiempo de una hora y media. Después de cinco horas y media de iniciado el calentamiento, ambos gradientes de temperatura son despreciables, al igual que los dos casos anteriores; por lo que más de la mitad de la cantidad de sustancia ya se ha fundido (figura 5.26).

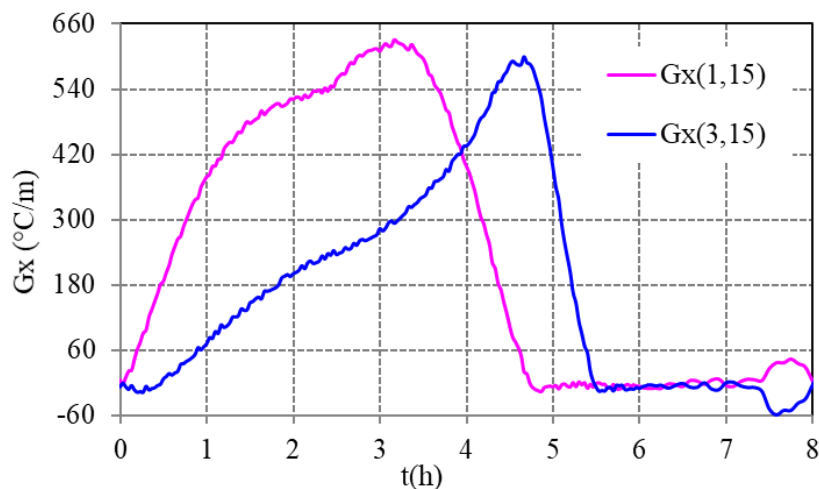


Figura 5.21: Gradientes de temperaturas horizontales a $y=15$ cm.

Los valores máximos alcanzados de ambos gradientes horizontales $G_x(1, y)$ y $G_x(3, y)$ a diferentes alturas $y=5, 10$ y 15 cm del recinto se muestran en la tabla 4.6, en todas las experiencias realizadas, dichos valores se encuentran entre 600 y 900 $^{\circ}\text{C}/\text{m}$.

y	$G_{x_{\max}}(^{\circ}\text{C}/\text{m})$ en $x=1$	$G_{x_{\max}}(^{\circ}\text{C}/\text{m})$ en $x=3$
5	804	679
10	807	588
15	620	599

Tabla 5.4: Valores máximos de gradientes horizontales.

5.2.2.3.2. Gradientes verticales

En la figura 5.22 se muestran los gradientes verticales cercanos a la pared caliente: $G_y(1, 15)$, $G_y(1, 10)$ y $G_y(1, 5)$. Se observa que si bien los gradientes crecen desde el inicio del calentamiento luego se mantienen constantes en un intervalo de una a dos horas del comienzo del mismo ($20 < G_y < 40$), esto se corresponde con los periodos de flujo predominantemente conductivo y con el de la transición a flujo convectivo, respectivamente.

Luego se advierte que en primer lugar comienza un crecimiento pronunciado del gradiente $G_y(1, 5)$, cercano al techo y luego los otros dos. El gradiente vertical cerca del techo crece alcanzando un valor máximo y luego disminuye, este comportamiento tiene una duración de aproximadamente 1 hora y media. El gradiente $G_y(1, 10)$, en $y=10$ se desarrolla de igual forma pero con un retardo de 30 minutos, entre las dos y cuatro horas de iniciado el calentamiento. En el caso del gradiente $G_y(1, 15)$, en $y=15$ se desarrolla de la misma manera con un retardo de 50 minutos entre las dos y cinco horas de iniciado el calentamiento.

Estos gradientes verticales no se anulan una vez que cesa la etapa de calentamiento a las 6 horas, sino que siguen evolucionando incluso alcanzando nuevos picos de valores más pequeños, los que podría deberse a la inercia térmica del sistema. Dichos gradientes se anulan solamente cuando la sustancia comienza a solidificarse, después de las ocho horas; por lo que una vez que cesa el calentamiento los procesos convectivos continúan desarrollándose en el interior del recinto.

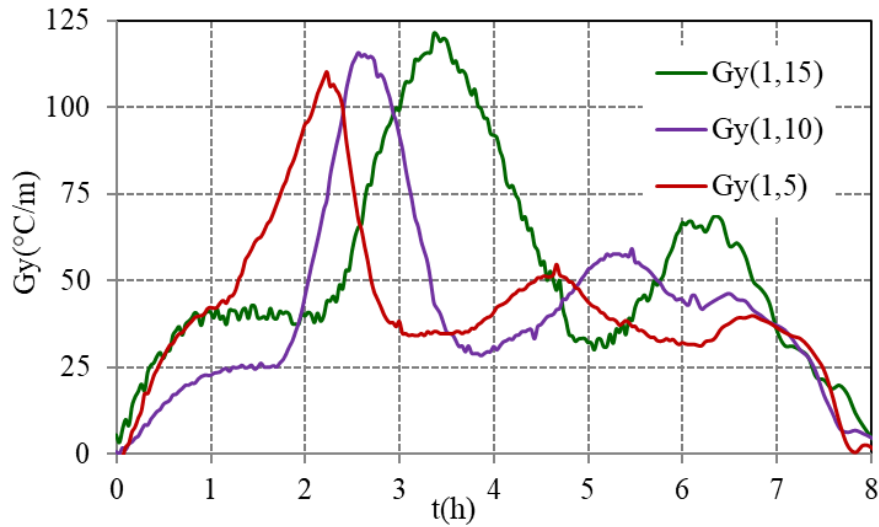


Figura 5.22: Gradienates de temperaturas verticales a $x=1$ cm.

En la figura 5.23 se muestran los gradientes verticales situados en una posición equidistante entre la pared caliente y la fría. En este caso el gradiente cercano a la pared superior $Gy(3, 5)$ crece desde el inicio del calentamiento. En la zona cercana al centro de la cavidad, el gradiente $Gy(3, 10)$, comienza a desarrollarse a partir de dos horas de iniciado el calentamiento. Esto se debe a que en la zona central del recinto antes de dicha hora, la sustancia es sólida.

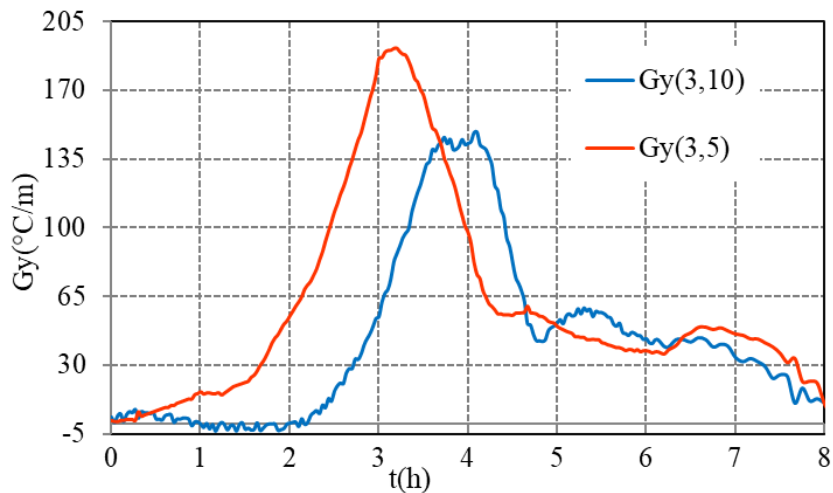


Figura 5.23. Gradienates de temperaturas verticales a $x=3$ cm.

Dichos gradientes alcanzan un máximo, en el caso del gradiente $Gy(3, 5)$ entre las dos y cuatro horas y $Gy(3, 10)$ entre las tres y cinco horas. Luego decrecen y finalmente, después de cuatro horas y media alcanzan valores cercanos a 50 °C/m, anulándose cuando la sustancia se solidifica.

Por último, a $x=5$ cm, (cercano a la pared fría) se calculan dos gradientes verticales: $G_y(5, 5)$ y $G_y(5, 10)$, que se muestran en la figura 5.24. Como en el caso anterior el gradiente que se desarrolla cerca de la pared superior crece desde el comienzo, pero el cercano a la zona central recién arranca a las dos horas y media; debido al retraso de la onda térmica y al hecho de que la sustancia está sólida.

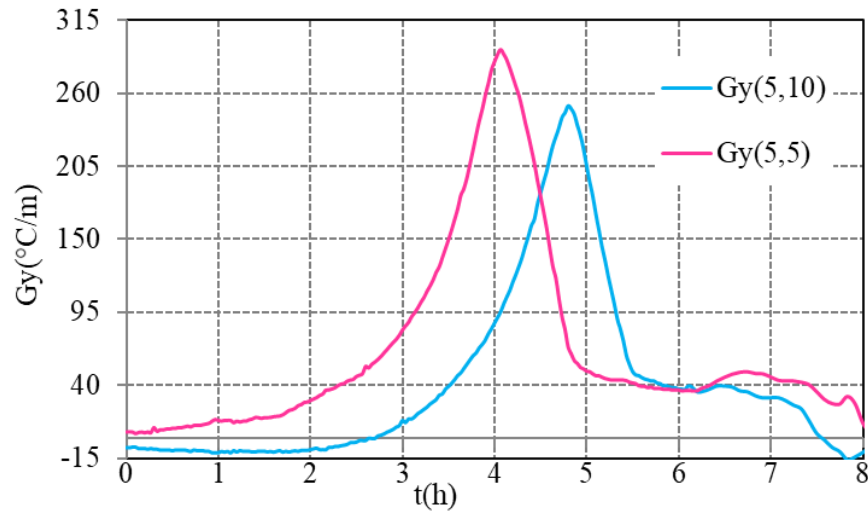


Figura 5.24. Gradientes de temperaturas verticales a $x=5$ cm.

En la tabla 5.5 se muestran los valores máximos alcanzados por los gradientes verticales.

y	t(h)	$G_{y_{\max}}(x=1)$	t(h)	$G_{y_{\max}}(x=3)$	t(h)	$G_{y_{\max}}(x=5)$
5	2,2	110	3,2	192	4,07	293
10	2,6	116	4,1	149	4,8	250
15	3,4	121				

Tabla 5.5: Valores máximos de gradientes verticales.

5.2.2.4. Visualización del proceso

5.2.2.4.1. Características del avance del frente de fusión

La figura 5.26 es una secuencia fotográfica del proceso de fusión que muestra la evolución temporal de la frontera sólido-líquido en la sustancia estudiada.

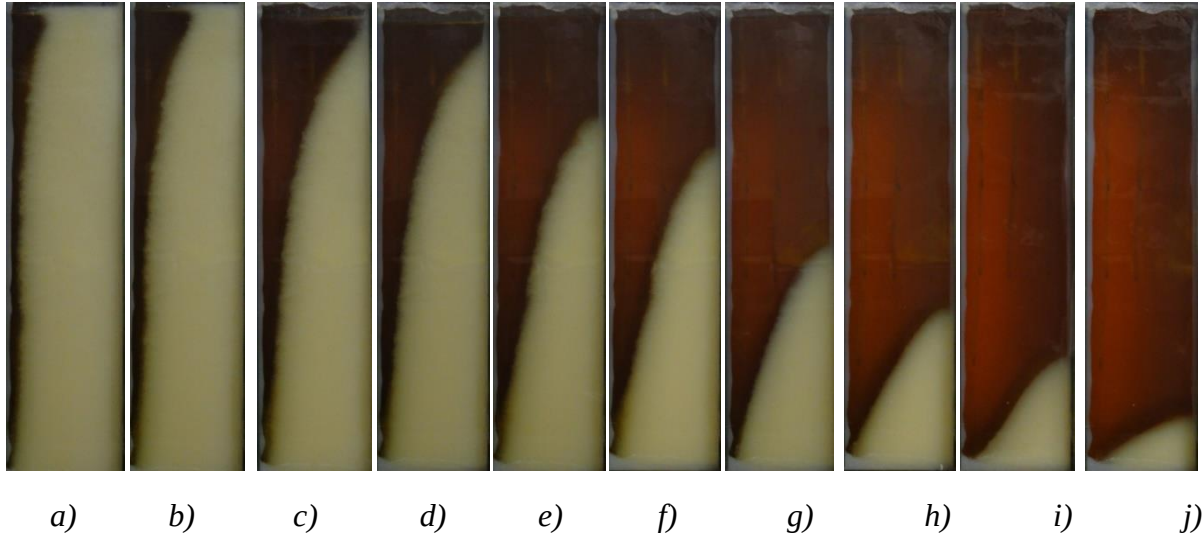


Figura 5.25: Evolución temporal del proceso de fusión en una grasa orgánica. a) $t=2$ horas, b) $t=2,5$ horas, c) $t=3$ horas, d) $t=3,5$ horas, e) $t=4$ horas, f) $t=4,5$ horas, g) $t=5,5$ horas, h) $t=5,75$ horas, i) $t=6$ h j) $t=6,5$ h.

En el trabajo (Hamdan, M y Al-Hinti, I., 2004) los autores trabajan con el octadecano como sustancia de cambio de fase y plantean una aproximación analítica para la posición de la frontera teniendo en cuenta el fenómeno convectivo. En dicho trabajo se plantea que el espesor local de la capa fundida, $S(y, t)$ tiene la siguiente forma:

$$S(y, t) = S_o(t) + y \tan \varphi \quad (4.5)$$

Donde $S_o(t)$ es el espesor de la capa fundida en la parte inferior de la cavidad a nivel de la base ($y=0$), φ es el ángulo de inclinación de la interfaz y puede ser evaluado en función del flujo de calor entregado al sistema, el tiempo, la altura del recinto etc.. Para este caso se supone que φ es independiente de la altura y .

Para la sustancia orgánica estudiada $S_o(t)$ es prácticamente cero o despreciable y se mantiene así durante todo el proceso; lo que puede significar que la transferencia conductiva es pequeña a nivel de la base del recipiente (Figura 5.25) en comparación con la convectiva. La aproximación lineal de $S(y, t)$ en nuestro caso no puede aplicarse ya que las fronteras observadas en los registros fotográficos muestran que la misma no es lineal y el ángulo de inclinación depende de la posición. Lo que se puede plantear en nuestro caso es una aproximación lineal por tramos. Esta forma curva del avance de la frontera no depende de la relación de aspecto (H/L), ya que en la figura 5.27 a) es de 0.24, en la 5.27 b) corresponde a una relación de aspecto de 0.5 y la 5.27 c) a 0.2. La concavidad de la curva cambia en la región superior una vez que el frente alcanza la esquina superior derecha, es decir cuando el flujo convectivo está totalmente desarrollado.



Figura 5.26: Visualización del frente de fusión en una sustancia orgánica con calentamiento lateral.

La producción de registros fotográficos del proceso, en particular las fotos mostradas en la figura 5.26, validan el modelo bidimensional utilizado, por lo que el movimiento en xyz puede ser aproximado como bidimensional en el plano xy.

5.2.2.4.2. Determinación de la fracción líquida

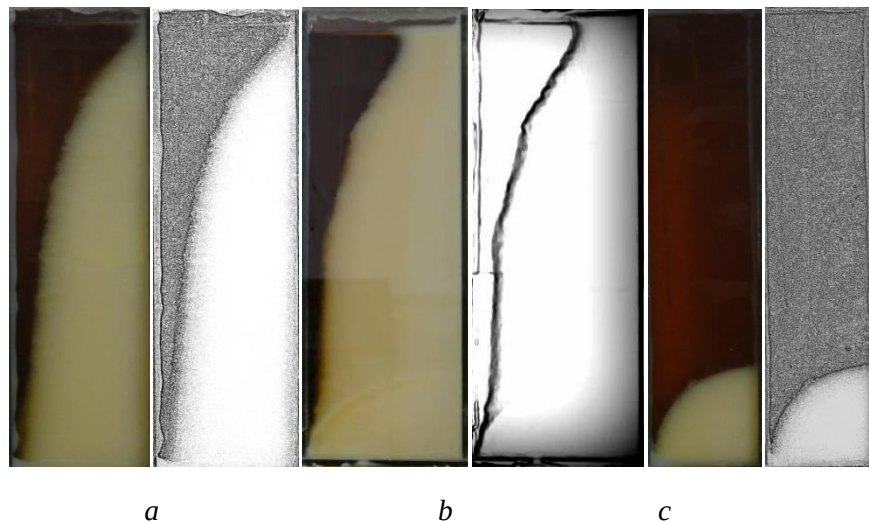


Figura 5.27: Diferentes tipos de procesamiento digital de las fotografías del proceso de fusión para diferentes relaciones de aspecto y/x. a: $H/L = 0.24$, b: $H/L = 0.5$ y c: $H/L = 0.2$

Para determinar la fracción de líquido presente se procesan las fotos con el software Picasa; mejorándolas en brillo y contraste, transformándolas por medio de un filtrado a una escala de grises, luego se puede pasar por un esbozo a lápiz de modo que se pueden obtener las imágenes de la figura 5.27. Luego, con el programa ImageJ, se determina la fracción de líquido presente haciendo un cociente de áreas, ya que en este procesador digital de imágenes se puede calcular áreas, ángulos, distancias, etc. Esto se realiza para cada foto y de ese modo podemos obtener la evolución temporal de la fracción de líquido desde el inicio del calentamiento.

En la figura 5.28, se muestra la evolución temporal y una aproximación polinómica para la misma para el recinto 1 de 25 cm de altura para dos valores de potencia: 17,5 W y 22W. Se observa que los valores de la fracción de líquido para 22 W de potencia son aproximadamente 1,5 veces los valores obtenidos para 17,5 W, pero ambas muestran el mismo ritmo de crecimiento.

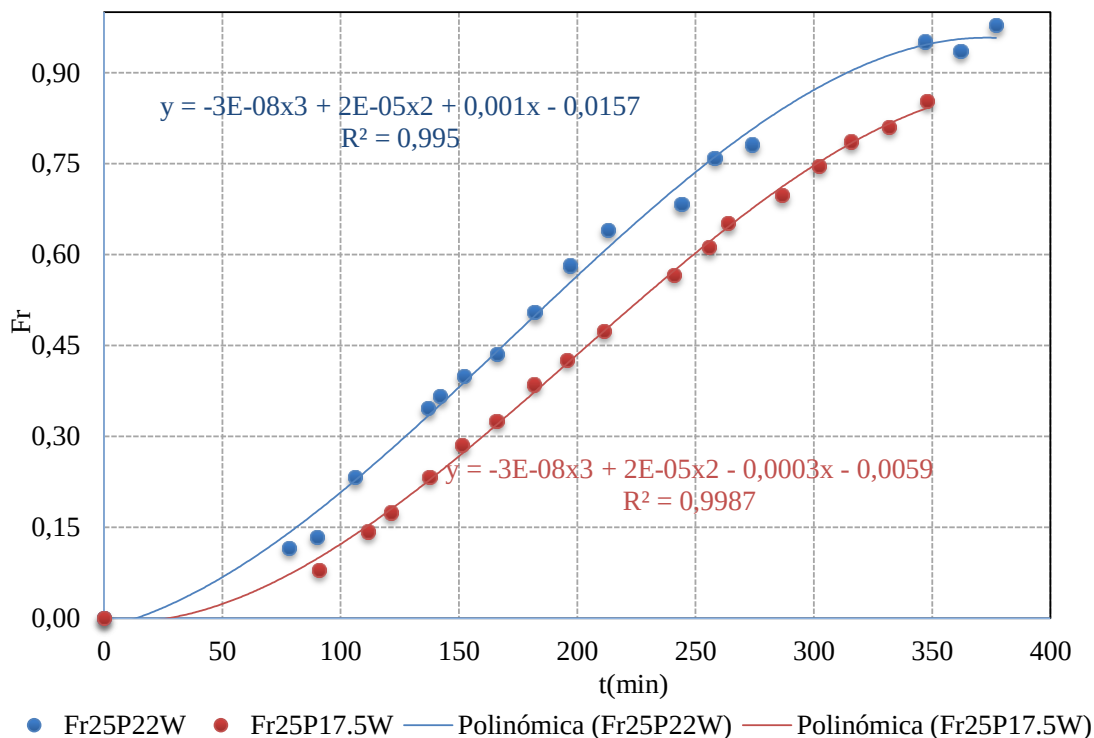


Figura 5.28: Evolución temporal de la fracción de líquido para dos valores de potencia en el Modelo 1.

En la Figura 5.29 se muestran los valores de la fracción de líquido para los recintos 1 y 2 (de 25cm y 30 cm de altura respectivamente) para la misma potencia de 17.5 W. Se observa que en el caso del recinto 1 al tener menor volumen y por lo tanto menor cantidad de sustancia la rapidez de crecimiento de la fracción de líquido es mayor que en el caso del recinto 2, que presenta mayor inercia térmica, ya que contiene una mayor cantidad de sustancia, lo que se evidencia al comparar las pendientes de las aproximaciones polinómicas.

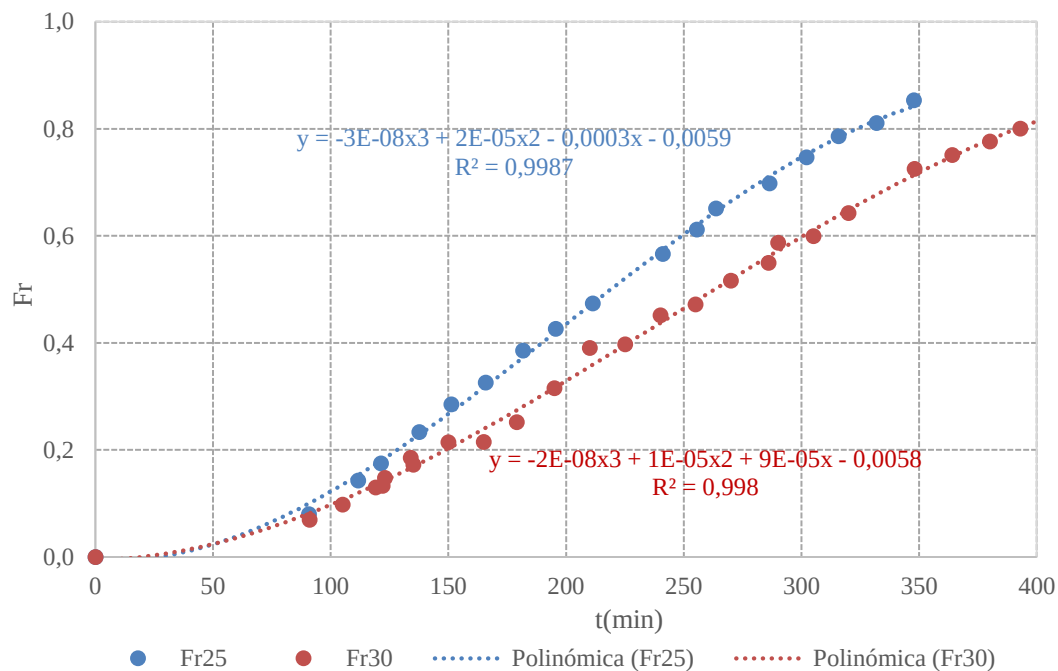


Figura 5.29: Evolución temporal de la fracción líquida para los modelos 1 y 2 (potencia de 17,5 W).

5.2.3. Conclusiones

Los gradientes verticales calculados a partir de las medidas térmicas realizadas muestran que es posible seguir la evolución del flujo convectivo en todas sus etapas. El comportamiento con valores pequeños del gradiente vertical cercano a la pared caliente responsable del establecimiento del flujo convectivo en las primeras horas del calentamiento refleja la etapa predominantemente conductiva. Dichos valores no nulos también revelan que desde el principio está presente y no puede ser despreciado. El crecimiento pronunciado de los mencionados gradientes a diferentes alturas muestra el inicio de la transición al régimen de convección natural. El decrecimiento de estos valores muestra la evolución del flujo convectivo que (con valores son más pequeños) solo cesa cuando la sustancia se solidifica.

Los valores alcanzados por los gradientes horizontales reflejan la propagación del fenómeno convectivo esta dirección, se puede afirmar que en la zona cercana al techo la rapidez de propagación y en definitiva el avance de la frontera es mayor, y decrece con la altura lo que está de acuerdo con los registros fotográficos mencionados. La anulación de los gradientes en esta dirección determina que la sustancia en dicha zona está completamente líquida y la temperatura tiende a uniformizarse.

Los registros fotográficos tomados cada quince minutos para las potencias ensayadas revelan todas las etapas del desarrollo del flujo presentes en el proceso de fusión de la sustancia. La forma del avance de la frontera en el interior de la sustancia, no cambia con la relación de aspecto de la cavidad, ni con la potencia ensayada, es siempre curva y no puede ser aproximada en forma lineal con la posición vertical, ya que la pendiente depende de ella. El espesor de la capa fundida en la parte inferior de la cavidad a nivel de la base del recipiente ($y=0$) es prácticamente 0 o despreciable y se mantiene así durante todo el proceso; lo que puede significar que la transferencia conductiva es pequeña a nivel de la base del recipiente en comparación con la convectiva. Las fotografías también confirman que el flujo puede ser aproximado en forma bidimensional en el plano x,y durante todo el proceso de fusión.

El procesamiento realizado de cada uno de los registros fotográficos permitió determinar en forma precisa la fracción de líquido presente en función del tiempo y realizar una aproximación polinómica de la misma.

5.3. Bibliografía

1. Hamad F. et al. (2017). Investigation of the melting process of polyethylene glycol 1500 (PEG 1500) in a rectangular enclosure. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 114, 1234–1247. Available online www.sciencedirect.com.
2. Hamdan, M y Al-Hinti, I. (2004). Analysis of Heat Transfer during the Melting of a Phase Change Material. *Applied Thermal Engineering* 24, 1935-1944.
3. 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.
4. 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.
5. Vilte M. y Bouciguez A. y Esteban S. (2013). Análisis de la transferencia térmica durante la fusión de un material de cambio de fase. *Revista AVERMA (Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente)*. Revista de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente. ISSN 0329-5184.
6. Vilte M., Esteban S. (2014). Análisis de la distribución de temperaturas en una sustancia que experimenta un proceso de fusión. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 17*, pp.03.17-03.24, 2013. Impreso en la Argentina. ISSN 2314-1433.
7. 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.
8. Vilte M., Blanc A., Curkovic G., Acosta V., Romero G., Dominguez D. y Martinez C. (2019). Visualización y análisis del frente de fusión de una sustancia orgánica para diferentes relaciones de aspecto. *Acta de la XLII Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 7*, pp. 02.91-02.99, 2019. Impreso en la Argentina. ISBN 978-987-29873-1-2.

Capítulo 6:

6. Acondicionamiento térmico de un local con material de cambio de fase. Simulación.

Se presenta a continuación un modelo que describe el acondicionamiento térmico de un recinto utilizando una sustancia de cambio de fase. El sistema consiste en dos recintos, en los cuales a través de una de sus paredes laterales ingresa un flujo de calor constante. Uno de los recintos tiene anexada una capa de grasa orgánica y se compara térmicamente con el de un local testigo sin esta sustancia. Se realiza un análisis del coeficiente convectivo involucrado. El perfil de temperaturas analizado es el correspondiente a la dirección del flujo térmico. La modelación se realiza utilizando el programa SIMUSOL. Los valores de temperatura obtenidos de la simulación numérica concuerdan con los experimentales con diferentes grados de aceptación, según la correlación empleada para el coeficiente convectivo. (Vilte M. et al, 2015). El objetivo de esta sección es modelar el proceso de transferencia de calor convectivo en los recintos con y sin pared de cambio de fase. Seguidamente se realiza, una descripción del dispositivo experimental, los resultados obtenidos de la experiencia, su correspondiente análisis, el modelo de simulación numérica con sus resultados y la comparación entre ambos.

6.1. Abordaje experimental

6.1.1. Dispositivo

Se construyen dos recintos iguales, colocando en uno de ellos otro recinto que contiene el material de cambio de fase. Una placa calefactora entrega la misma cantidad de energía a cada recinto: a uno directamente y al otro a través de la pared de PCM, tal como se muestra en la Figura 6.1. Los detalles de construcción de los recintos y de los sensores de temperatura empleados se encuentran en las tablas 6.1 y 6.2, además del trabajo de Vilte y Bouciguez (Vilte y Bouciguez, 2009).

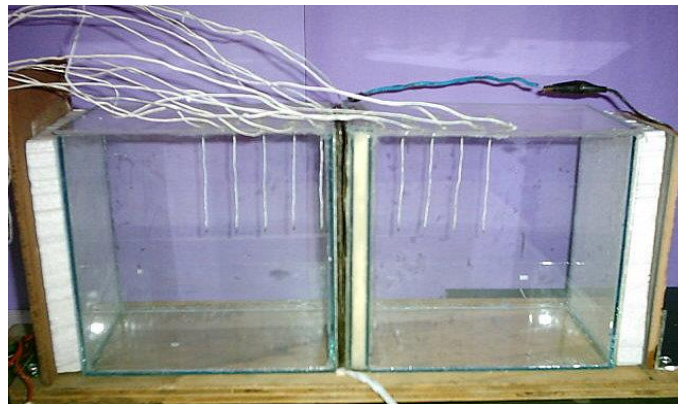


Figura 6.1: Dispositivo experimental: recintos, PCM, calefactor y sensores de temperatura.

Recinto	Modelo	Dimensiones(m)	Sustancia que contiene
Sin Acondicionamiento Térmico	s	0,12X0,18X0,18	Aire
Con Acondicionamiento Térmico	g	0,12X0,18X0,18	Aire
Contenedor de PCM		0,12X0,18X0,012	Sustancia orgánica

Tabla 6.1: Información general sobre los recintos empleados en las experiencias.

Temperaturas en el interior del recinto s	Temperaturas en el recinto s	Distancia del sensor a la pared calentada (cm)	Temperaturas en la pared calentada de los recintos s y g	Temperatura en el centro del Recinto con PCM
Ts0	Tg0	0,20	Tvs (interior)	Tg
Ts2	Tg2	2,25	Tps (exterior)	
Ts4	Tg4	4,50	Tvg (interior)	
Ts6	Tg6	6,75	Texg (exterior)	
Ts9	Tg9	9,00		

Tabla 6.2: Notación y ubicación de los sensores empleados en las experiencias.

La disposición de los sensores de temperatura se esquematiza en la Figura 6.2, conjuntamente con la nomenclatura empleada en su identificación posterior, la que será utilizada en los correspondientes gráficos que muestran los resultados de las experiencias realizadas.

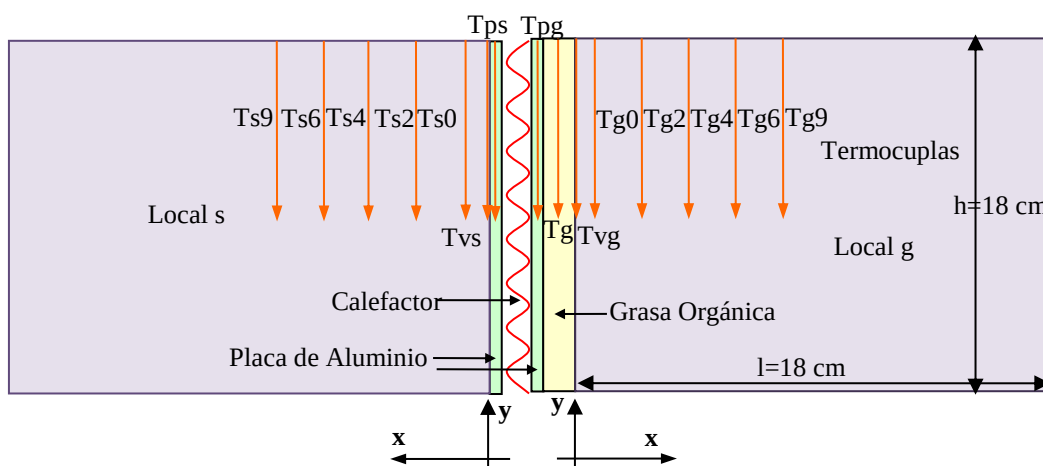


Figura 6.2: Esquema de la disposición de los sensores térmicos en los recintos.

6.1.2. Resultados experimentales obtenidos

Como se señaló anteriormente en la figura 6.1, se construyeron dos recintos iguales, a uno de ellos se le adosó un recipiente de igual superficie lateral que contenía el material de cambio de fase en su interior; la placa calefactora, por su construcción y colocación, entrega la misma cantidad de calor hacia ambos recintos. Se ensayaron dos condiciones térmicas diferentes para el conjunto integrado por los dos recintos, el material de cambio de fase y la placa calefactora que se detalla en la siguiente tabla:

Experiencia	Condiciones Externas	Potencia Aplicada (W)
1	Sistema en contacto con el ambiente	9
2	Sistema aislado térmicamente	5,6

Tabla 6.3. Condiciones de las experiencias realizadas.

En el caso, de la experiencia 1, los recintos están expuestos a la influencia del ambiente, mientras que en los de la experiencia 2 están aislados. Ambas situaciones son perfectamente factibles en la práctica, la primera puede representar un local destinado por ejemplo al alojamiento de animales recién nacidos; mientras que la segunda puede asociarse al interior de un transporte aislado térmicamente. Los locales reciben el calor entregado por el calefactor, ya sea directamente o a través de la sustancia de cambio de fase. No se ha agregado masa térmica a ninguno de ellos. En la Figura 6.3 se presenta, el perfil térmico en función del tiempo en el interior de los recintos (s y g), para la experiencia 1. La etapa de calentamiento dura veinticuatro horas, observándose que el perfil térmico alcanza el estado estacionario a las seis horas de iniciado el proceso, manteniéndose estable aun cuando continúa ingresando calor al sistema, lo que evidencia la influencia del entorno.

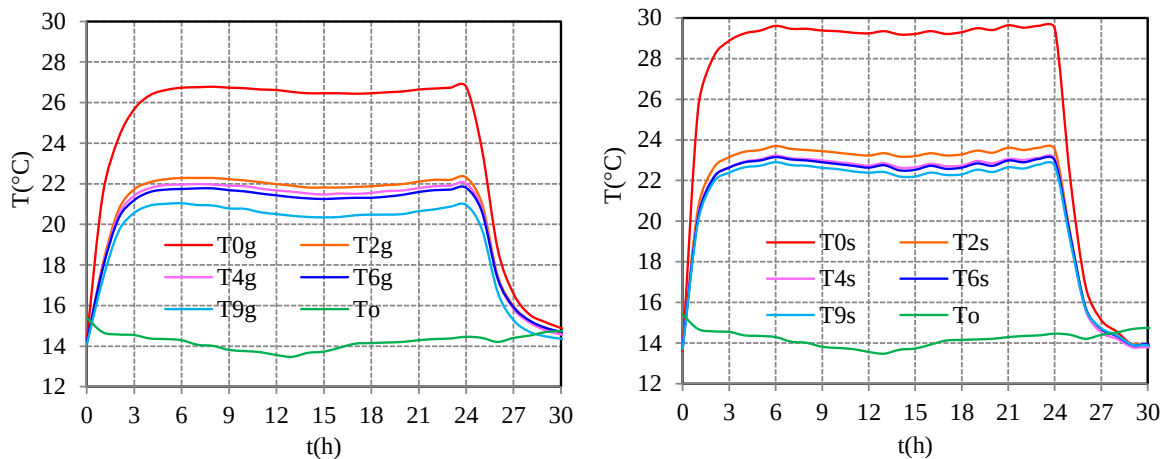


Figura 6.3: Evolución de temperaturas en los recintos de la experiencia 1.

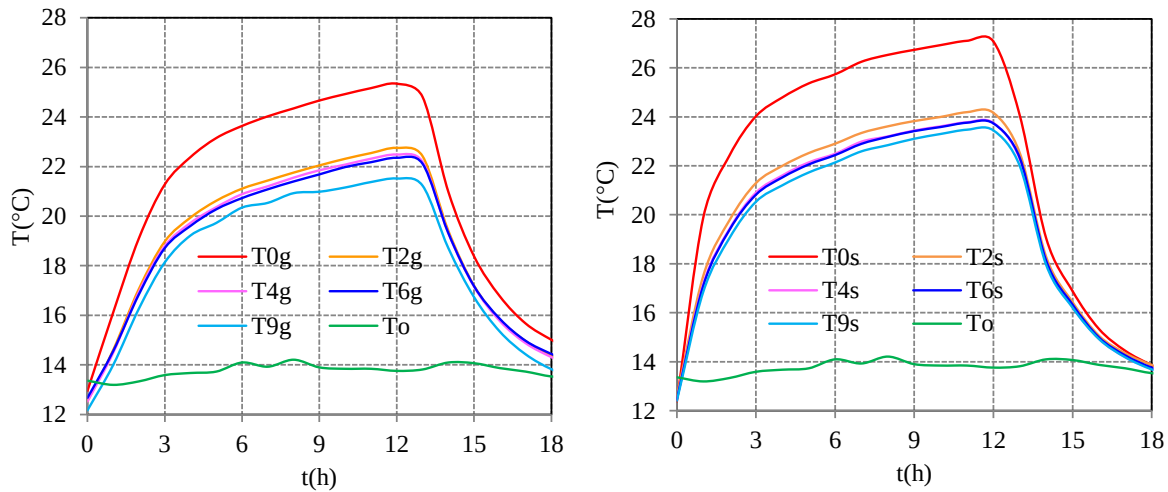


Figura 6.4: Evolución de temperaturas en los recintos de la experiencia 2.

En la Figura 6.4, se presenta la distribución de temperaturas en función del tiempo en ambos recintos s y g para la experiencia 2. La etapa de calentamiento dura doce horas, observándose que el perfil térmico sigue creciendo en el tiempo sin alcanzar el estado estacionario.

6.2. Consideraciones acerca del coeficiente convectivo

Para abordar el problema planteado en forma numérica se requiere hacer algunas consideraciones, en primer lugar, se parte de la hipótesis que la transferencia de calor es unidireccional en lo que hace a las paredes que constituyen el local. Este supuesto es ampliamente utilizado para las simulaciones térmicas de los edificios.

Por otro lado, la transferencia de calor por convección a lo largo de superficies de un recinto es un fenómeno muy complejo. Una de las razones de esta complejidad se debe al régimen de flujo en la capa límite. (Awbi, 1999) resalta, con una prueba de humo, la presencia de laminar y flujos turbulentos a lo largo de las paredes de un local.

En la bibliografía se presentan dos métodos para hacer frente a la complejidad de la transferencia de calor en la superficie de las paredes de un recinto. El primer método consiste en medir las temperaturas y el flujo de calor en una celda de prueba de tamaño real para obtener una expresión del coeficiente medio de transferencia de calor h . El segundo método denominado pseudo-teórico, consiste en un estudio separado de cada fenómeno involucrado en la transferencia de calor en la superficie de la pared. Cada estudio conduce a una expresión del coeficiente de transferencia de calor por convección. (Alamdari y Hammond, 1983), combinan dos correlaciones para la convección natural laminar y regímenes turbulentos, obteniendo la siguiente la ecuación:

$$h_1 = \left[\left(1,51 \frac{|\Delta T|^{\frac{1}{4}}}{H} \right)^6 + \left(1,33 \Delta T^{\frac{1}{3}} \right)^6 \right]^{1/6} \quad (6.1)$$

El término ΔT corresponde al valor promediado de la diferencia de temperatura entre la superficie de la pared y el aire dentro de la habitación. H es la altura de la pared.

(Awbi y Hatton, 1999) realizaron mediciones en una celda de ensayo de 3mx3mx 2,5 m. La celda de ensayo comparte una pared con una habitación regulada en la que se reproducen las condiciones exteriores. Diferentes configuraciones de calefacción se han probado con una red de películas de calefacción, dispersas sobre la superficie de las diferentes paredes. Los autores desarrollaron la siguiente correlación de sus datos de medición:

$$h_2 = 1,823 \frac{|\Delta T|^{0,293}}{D^{0,121}} \quad (6.2)$$

D es el diámetro hidráulico de la pared (superficie dividida por perímetro).

(Liu y Awbi, 2009) realizaron mediciones en la misma celda de ensayo, incluyendo materiales de cambio de fase en una de las paredes. Observaron un valor del coeficiente de convección a lo largo de la pared PCM era 2,3 veces mayor que el valor predicho a partir de la correlación anterior:

$$h_3 = 2,3 \times 1,823 \frac{|\Delta T|^{0,293}}{D^{0,121}} \quad (6.3)$$

Para el sistema aquí estudiado, los ensayos experimentales realizados permiten determinar el coeficiente convectivo involucrado en la pared caliente. Suponiendo que el calor transferido por conducción a través de la superficie del vidrio es el que está involucrado en la transferencia convectiva entre la pared caliente y el aire a menor temperatura, se utilizó la siguiente expresión para calcular el coeficiente convectivo en la pared:

$$h_{expe} = \frac{k}{e} \frac{(T_{in} - T_{ex})}{(T_{in} - T_{aire})} \quad (6.4)$$

Donde, donde el coeficiente (k/e) tiene en cuenta la conductividad térmica y el espesor del vidrio en la pared caliente, T_{in} : la temperatura en la superficie interna de la pared de la cavidad, T_{ex} la temperatura en la superficie externa y T_{aire} : la temperatura en el aire a 0,2 cm de la superficie interna de la pared de la cavidad.

En la figura 6.5 se muestran los coeficientes de transferencia convectivos, para la experiencia 1, obtenidos con el método pseudo-teórico propuesto por: Alamdari and Hammond (h_1), Awbi and Hatton (h_2), Liu and Awbi (h_3) y los obtenidos experimentalmente (h_{exp}). Se observa que para ambos locales ensayados (s y g) los coeficientes pseudoteóricos obtenidos dan valores más bajos que los coeficientes medidos experimentalmente. Los valores de los coeficientes convectivos para el caso del local sin PCM son más próximos entre sí. En el caso

del local acondicionado con grasa se observa mayor diferencia o dispersión para los valores obtenidos, es evidente que la presencia del material de cambio de fase impone otra dinámica al comportamiento de este local.

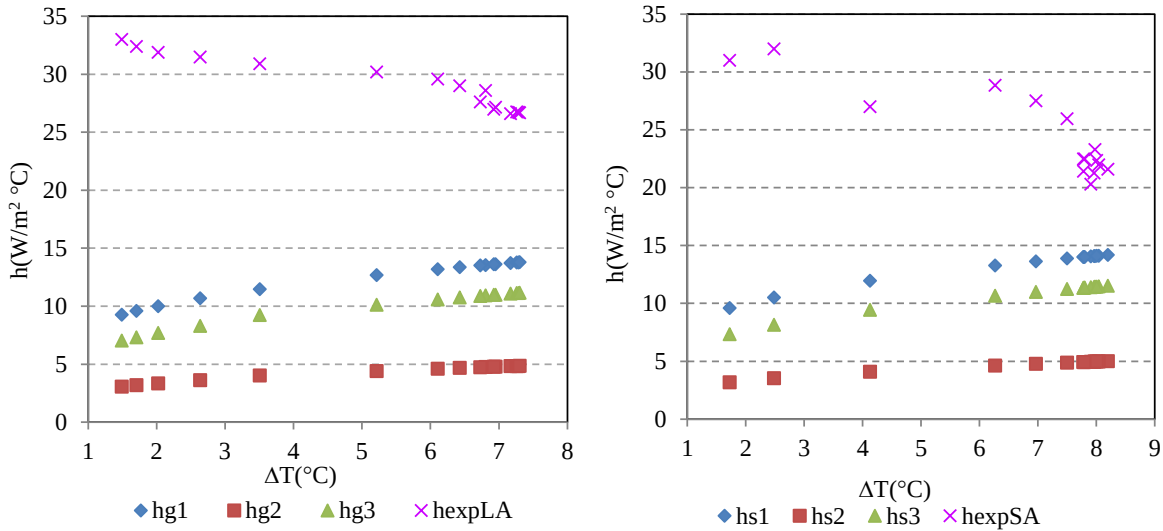


Figura 6.5: Correlaciones para los coeficientes de transferencia convectiva en la experiencia 1.

Se considera que la transferencia de calor desde el calefactor a los locales se realiza por conducción dentro de la sustancia orgánica (grasa) y por convección en el interior de los locales llenos de aire. Se desestiman las transferencias térmicas por radiación en el sistema considerado. Debido a la baja conductividad del aire, las transferencias conductivas en el interior de los locales son despreciadas.

La sustancia se encuentra inicialmente sólida a temperatura menor a la de fusión y está contenida en un recipiente de base rectangular. Dado que el espesor de capa de grasa es pequeño ($e=0.012 \text{ m}$), como resultado del ingreso de calor, el frente de fusión se desplaza prácticamente sin deformación, por lo que la transferencia de calor puede considerarse totalmente

6.3. Simulación numérica

Para realizar la simulación numérica del comportamiento del aire en el interior de los locales, se utiliza el programa SIMUSOL, el que permite modelar el funcionamiento transitorio de sistemas físicos (Saravia y Alia, 2001;Alia et al,2002).

Los sistemas térmicos que SIMUSOL puede resolver son los de parámetros concentrados, es decir aquellos en que la variable de interés, como la temperatura, se asume en un punto (nodo). Estas variables definen un sistema cuyo comportamiento puede cambiar a medida que

transcurre el tiempo. El programa SIMUSOL puede calcular esta variación, producida por el intercambio de flujos de calor entre las partes del sistema y el exterior, para lo cual debe definirse el sistema de forma adecuada para que el programa pueda resolverlo. Para ello SIMUSOL utiliza varios programas de uso libre: Dia, Sceptre y Gnuplot. En muchos casos es posible transformar un sistema que no es “a parámetros concentrados” en otro que sí lo es, pudiendo entonces realizar un cálculo aproximado del sistema utilizando el Simusol. La representación es aproximada y los resultados se aproximarán al resultado exacto cuando se aumente el número de partes que se utilice.

El proceso de cálculo es el siguiente: luego de introducir los datos a través del programa DIA, se llama al SIMUSOL el cual ejecutará los distintos programas: SCEPTRE, GNUPLLOT y las interfaces de manera automática para producir los resultados de la simulación.

El programa resulta confiable y relativamente sencillo de implementar. Además permite graficar inmediatamente los resultados obtenidos y superponer otros gráficos a los efectos de realizar una comparación. Los elementos empleados en los diagramas del Programa DIA se muestran en la figura 6.6:

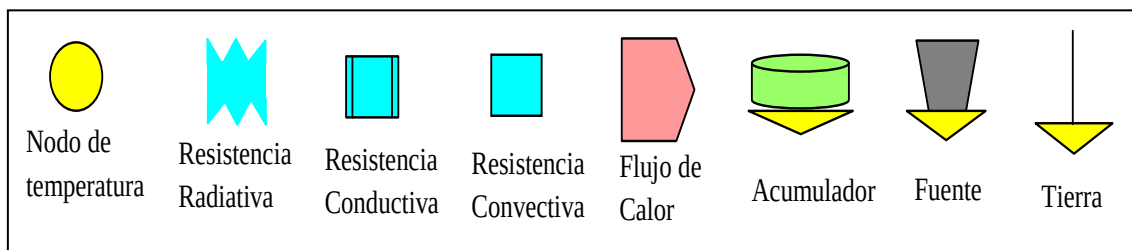


Figura 6.6: Elementos empleados por el programa DIA.

RESULTADOS OBTENIDOS

A continuación, se muestran los diagramas del programa DIA (figura 6.7) en formato jpg y los resultados obtenidos de la simulación en forma gráfica para los diferentes casos.

Experiencia 1: El conjunto integrado por los dos recintos, el material de cambio de fase y la placa calefactora; están en contacto con el exterior. En este caso se considera que:

- Hay tres nodos principales de temperatura: interior de la grasa (GRAS), local acondicionado con grasa (LAG) y local sin acondicionamiento (LSA), cada uno de los cuales tiene su correspondiente masa térmica (GRAS, LSA, LAG), los demás son nodos secundarios.
- El flujo de calor (CALE) que representa el suministrado por la placa calefactora incide sobre la superficie de una placa de aluminio (CHSA y CHLA) que, adosada a la pared de los recintos de vidrio, uniformiza la temperatura. El flujo de calor aplicado es de 210 W/m^2 .
- El nodo (AMB) representa la temperatura del ambiente o exterior (T_{amb}) y está conectado a una fuente de temperatura constante igual a 14°C (temperatura ambiente del laboratorio).

La transferencia de calor por conducción se considera en los siguientes elementos del circuito:

- Grasa ($k=0,8 \text{ W/m }^\circ\text{C}$) con un espesor de $0,012 \text{ m}$, un área de $0,0216 \text{ m}^2$.
- Paredes de vidrio ($k=1,05 \text{ W/m }^\circ\text{C}$) de los recintos, con un espesor de $0,003 \text{ m}$, un área de $0,0216 \text{ m}^2$.
- Placa de aluminio que se ubica entre los recintos y la placa calefactora ($k=232 \text{ W/m }^\circ\text{C}$) con un espesor de $0,001 \text{ m}$.

La transferencia por convección se considera en el interior de los recintos llenos de aire, en un área de $0,15 \text{ m}^2$. Además, ambos recintos pierden energía al exterior por convección ($h=5 \text{ W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$) en un área total de $0,1296 \text{ m}^2$.

La tabla Datos de la figura 6.8 describe resumidamente los valores de los distintos elementos del circuito Simusol para el sistema, figura 6.7. En la misma figura se incorpora la Tabla 1 correspondiente a los valores de la capacidad calorífica de la grasa, que tiene en cuenta el cambio de fase que la grasa experimenta entre los 37 y 42°C . Se ha simulado el sistema para las cuatro correlaciones de coeficientes convectivos (h_1, h_2, h_3, h_{expe}) dados por las ecuaciones 6.1, 6.2, 6.3 y 6.4, que ingresan a través de los archivos HCONVG y HCONVS para ambos recintos, respectivamente. La Tabla 2 corresponde a los valores de temperatura experimentales del local acondicionado (LAG) y la Tabla 3 a los valores de temperatura experimentales del local no acondicionado (LSA). Ambas se leen a través del cuadro TABLA_ARCHIVO, que permite el acceso a distintos archivos de datos (TempLAG1807.txt y TempLSA1807.txt), en los que se encuentran los valores experimentales de temperatura. Dichas tablas se utilizan en la generación de gráficos.

TABLA 1	GRAFICOS	TABLAS ARCHIVOS	DATOS
factores=3600,1 0,6100 10,6100 20,6100 30,6100 37,6100 37,120000 40,120000 42,120000 45,120000 45,7100 50,7100 60,7100 70,7100 80,7100 90,7100	archivo LAG=TempLAG1807.txt variables LAG= tiempo, TLAgexp unidades LAG=hora, gradoC ejes GRAFACOND1=tiempo (hora), temp(gradoC) puntos GRAFACOND1 = LAG, 1:2 líneas GRAFACOND1=SIMULADO, 1:2 archivo LSA=TempLSA1807.txt variables LSA= tiempo, TLSAexp unidades LSA=hora, gradoC ejes GRAFACOND1=tiempo (hora), temp(gradoC) puntos GRAFACOND1=LSA, 1:2 líneas GRAFACOND1=SIMULADO, 1:3	archivo LAG=TempLAG1807.txt columna TABLA2=LAG, 1:2 factores TABLA2=3600,1 archivo LSA=TempLSA1807.txt columna TABLA3=LSA, 1:2 factores TABLA3=3600,1 archivo HCONVS=hsexpe.txt columna TABLA4=HCONVS, 1:2 factores TABLA4=3600,1 archivo HCONVG=hgexpe.txt columna TABLA5=HCONVG, 1:2 factores TABLA5=3600,1	CGRAS=C1, TABLA1(TEMP GRAS),0.237 CLAG=C1,1006,0.00391 CLSA=C1,1006,0.00391 JCALE=JQ,0.0216,210 EAMB=PAMB RCHSA= D1, 0.0216,0.001,232 RV1SA= D1, 0.0216,0.003,1.05 RA1SA=V1,0.0756,TABLA4(TIEMPO) RA2SA=V1,0.0756,TABLA4(TIEMPO) RV2SA= D1, 0.0864,0.003,1.05 RA3SA=V1,0.0864,5 RCHLA= D1, 0.0216,0.001,232 RV1LA= D1, 0.0216,0.003,1.05 RC1LG= D1, 0.0216,0.006,0.6 RC2LG=D1,0.0216,0.006,0.6 RV2LA= D1, 0.0216,0.003,1.05 RA1LA=V1,0.0756,TABLA5(TIEMPO) RA2LA=V1,0.0756,TABLA5(TIEMPO) RV3LA=D1,0.0864,0.003,1.05 RA3LA=V1,0.0864,5 RVPLA=D1,0.0432,0.003,1.05 RMPLA=D1,0.0432,0.15,0.06 RAPLA=V1,0.0432,5 RVPSA=D1,0.0432,0.003,1.05 RMP5A=D1,0.0432,0.15,0.06 RAPSA=V1,0.0432,5
	INICIALES	PARAMETROS	TIEMPO
	Temp LSA=14 Temp LAG=14 Temp GRAS=14	PAMB=14	24 horas
			CONTROLES
			INTEGRATION ROUTINE = IMPLICIT
			RESULTADOS
			TEMP LSA TEMP LAG

Figura 6.8: Cuadros de datos para la Experiencia 1.

Los resultados obtenidos de la simulación y los de la experiencia se muestran en la figura 6.9, se grafican las temperaturas en el centro de ambos locales: el acondicionado (LAG) y el no acondicionado (LSA). Los resultados simulados corresponden al coeficiente convectivo h_3 (pseudotéorico) para el recinto acondicionado con grasa y al coeficiente h_1 (pseudotéorico) para el recinto sin acondicionamiento.

Se observa que hay un acuerdo aceptable entre los valores experimentales y los simulados. Los resultados obtenidos con h_1 para el recinto acondicionado con grasa y con h_3 para el recinto sin acondicionamiento, muestran un comportamiento similar al mostrado en la figura 6.9. Cuando se simula el sistema empleando las correlaciones h_2 y h_{expe} , en general, los valores simulados son mayores a los experimentales y se observa una mayor dispersión.

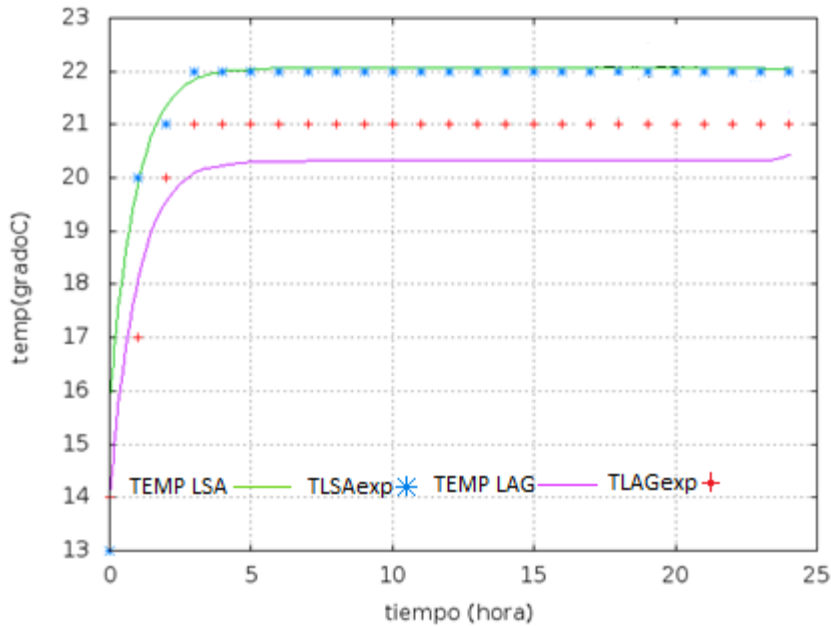


*Figura 6.9: Resultados experimentales y simulados de la temperatura de los dos recintos.
Experiencia 1.*

Experiencia 2: Conjunto integrado por dos recintos, el material de cambio de fase y la placa calefactora aislado térmicamente del medio exterior.

La aislación se realiza con placas de poliestireno expandido ($k=0,04 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$) de 1,5 cm de espesor en un área total de $0,1296 \text{ m}^2$. El flujo de calor aplicado es de 128 W/m^2 . En este caso no se muestra el diagrama del programa DIA ya que los elementos gráficos usados son los que, ya introducidos en los anteriores diagramas, por lo que se estiman suficientes las consideraciones realizadas.

En la Figura 6.10 se muestran los valores obtenidos experimentalmente respecto de los simulados para la experiencia 2, usando para el coeficiente convectivo la correlación h_2 (pseudoteórico) para el local acondicionado con grasa y h_3 para el local sin acondicionar. Los valores de temperatura obtenidos de la simulación para ambos locales presentan el siguiente comportamiento: son superiores a los obtenidos experimentalmente, en la etapa inicial (transitoria) y son inferiores después de las 8 horas de iniciado el calentamiento. En este aspecto se observa debe mejorarse el modelo para reproducir los valores experimentales, sobre todo en la etapa transitoria.

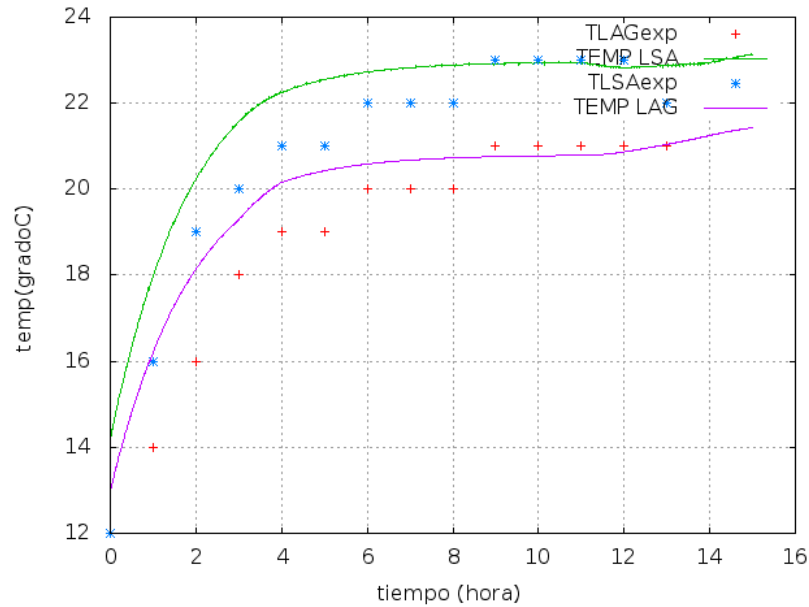


Figura 6.10: Resultados experimentales y simulados de la temperatura de los dos recintos.
Experiencia 2.

6.4. Conclusiones

Las grasas orgánicas de origen vegetal y animal, tienen propiedades físicas que las hacen adecuadas para llevar a cabo el acondicionamiento térmico de recintos para diversos usos, además de estar disponibles en plaza a costos razonables. Los resultados experimentales permiten inferir que la sustancia de cambio de fase empleada en este caso puede retrasar la onda térmica proveniente de una fuente de calor.

Para la experiencia 1, comparando los locales acondicionados y sin acondicionar, se observa que en el caso del recinto sin acondicionar los diferentes valores de h_1 , h_2 , h_3 y h_{expe} presentan una menor dispersión. Para el recinto acondicionado con el material de cambio de fase los valores de h obtenidos presentan una mayor variación, lo que manifiesta que el fenómeno de convección natural se debe seguir estudiando específicamente en presencia de materiales de cambio de fase.

El programa SIMUSOL, permite evaluar el comportamiento térmico de diversos sistemas físicos, en particular, los problemas de transferencia de calor con y sin cambio de fase. En este capítulo, el programa permite evaluar de manera sencilla, diferentes correlaciones del coeficiente de transferencia convectivo consideradas, como así también la comparación con los datos experimentales.

De los resultados de la simulación, para la experiencia 1, se observa que usando la correlación del coeficiente convectivo, h_3 , para el recinto acondicionado con grasa y del coeficiente, h_1 , para el recinto sin acondicionamiento, hay un acuerdo aceptable entre los valores experimentales y los simulados. Para el caso del recinto sin acondicionar, los resultados simulados ajustan mejor que para el caso del recinto acondicionado. En este aspecto hay algunas propiedades del material de cambio de fase que deben determinarse con mayor precisión.

En el caso de la experiencia 2, la correlación para el coeficiente convectivo que mejor ajusta los valores simulados a los experimentales es h_2 para el recinto sin acondicionar y h_3 para el recinto acondicionado con grasa. Se observa que el modelo debe mejorarse para reproducir los valores experimentales, sobre todo en la etapa transitoria.

6.5. Bibliografía

1. Alamdari F., Hammond G. (1983). Improved data correlations for buoyancy-driven convection in rooms, *Building Services Engineering Research and Technology* 4. 106-112.
2. Alia D., Saravia L. y Saravia D. (2002). Avances Introducidos en la capacidad del simulador de Sistemas Solares Térmicos Simuterm (Simusol). *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Revista de la Asociación Argentina de Energía Solar*. Vol 6 N°2 pág.8.31--8.36.
3. Awbi H., Hatton A. (1999). Natural convection from heated room surfaces, *Energy and Buildings* 30-233.
4. Bejan A. (1995). *Convection Heat Transfer*. 2ª edición, pp. 220-224. Wiley Interscience, New York.
5. Liu H., Awbi H. (2009). Performance of phase change material boards under natural convection, *Building and Environment*. 1-6.
6. Saravia L. y Alia D. (2001). Simuterm: Un simulador de sistemas solares térmicos. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Revista de la Asociación Argentina de Energía Solar*. Vol5 N° 2 pág. 8.07 -- 8.12.
7. Vilte M. y Bouciguez A. (2009). Acondicionamiento de un local con una grasa orgánica. Abordaje experimental. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente (AVERMA)*, revista de la Asociación Argentina de Energía Solar). Vol. 13 Sección 3, Pag. 47-54. Impreso en la Argentina, ISSN 0329-5184.
8. Vilte M., Esteban S. y Bouciguez A. (2015). Acondicionamiento térmico con sustancias de cambio de fase. Estudio experimental y numérico. *Acta de la XXXVIII Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente* Vol. 3, pp. 03.95-03.106, 2015. Impreso en la Argentina. ISBN 978-987-29873-0-5

Capítulo 7: Conclusiones Generales

En este trabajo de Tesis se ha ensayado como material de cambio de fase una sustancia comercial. La falta de información en cuanto a las propiedades térmicas que la caracterizan, ha llevado realizar distintas experiencias que tuvieron como objetivo determinar alguna de ellas. A continuación, se describen los principales resultados:

- En primer lugar, se realizó una búsqueda bibliográfica de estimaciones y correlaciones respecto a las propiedades térmicas relacionadas con el proceso de fusión (densidad, difusividad térmica, conductividad térmica, etc.). En esta tesis se tuvieron en cuenta las correlaciones obtenidas por Choi y Okos en 1987 para la densidad, conductividad térmica, etc., función de la temperatura para los componentes de humedad, proteínas, lípidos, carbohidratos, fibras y cenizas de la grasa vacuna. Por otro lado, se obtuvo la composición centesimal de la grasa primero a través de la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación) y luego a partir del trabajo (Ochoa O. et al, 2006). Esto permitió comparar los valores de algunas propiedades obtenidas experimentalmente con los valores estimados por dichas correlaciones.
- Se determina la densidad del material de cambio de fase ensayado (grasa vacuna) a 50 °C. El valor la densidad de la grasa orgánica (ecuación 3.2), resulta:

$$\rho_{exp} = (891,20 \pm 0,02) \frac{kg}{m^3}$$

Teniendo en cuenta las correlaciones y la composición centesimal de la grasa mencionadas se puede establecer que la densidad de la sustancia a 50°C (ecuación 3.4) es de:

$$\rho_{teórico} \cong 911,93 \frac{kg}{m^3}$$

Se puede comparar este valor con el obtenido experimentalmente y se encuentra una variación relativa porcentual, la cual está dentro de los errores experimentales corrientemente aceptados (5 %).

- Las medidas de viscosidad en el caso de las sustancias alimenticias, se realizan para control de calidad de las mismas, las medidas llevadas a cabo en esta Tesis se realizan en vistas de mejorar la caracterización de la sustancia; para simular el complejo proceso de fusión que involucra fenómenos conductivos y convectivos. La viscosidad obtenida experimentalmente para la grasa vacuna se puede expresar como:

$$\mu_{grasa}(50^{\circ}C) = (0,0053 \pm 0,0002) \frac{kg}{m.s}$$

No se encuentra, en la bibliografía consultada, valores de viscosidad para sustancias orgánicas, como la grasa estudiada en esta Tesis. Sin embargo, en el trabajo presentado por Rodríguez Martínez (Rodríguez Martínez et al., 2012) se determina el valor de viscosidad para un aceite: μ (40 °C) $\approx$ 0,003 kg/m.s, por lo que el valor obtenido, se aproxima al mismo.

- En cuanto al punto de fusión, el estudio con la técnica de MDSC, proporciona un valor de temperatura de fusión preciso. Para el caso de la grasa orgánica, utilizando una muestra de 9 mg, con la técnica mencionada se obtiene el valor de temperatura (ecuación 3.11) para el cual ocurre el cambio de fase resulta:

$$T_F = (32,19 \pm 0,01) ^\circ C$$

Para contrastar este valor se analiza el fenómeno de sub-enfriamiento, el cual nos permite determinar en forma aproximada la temperatura de solidificación para la sustancia estudiada. Se conoce que ambas temperaturas no son iguales en el caso de sustancias que no son puras. Del análisis de dicho fenómeno se obtiene:

$$31.5^\circ C \leq T_{sol} \leq 33^\circ C$$

Se advierte que la temperatura de solidificación se encuentra cercana al punto de fusión, su diferencia muestra que la grasa vacuna no es una sustancia pura.

- Empleando la línea de resolución de problemas de conducción inverso, se realiza la determinación de la conductividad (ecuación 3.21) y difusividad térmicas (ecuación 3.22) de la grasa vacuna:

$$k_s = (0,50 \pm 0,01) W/m^\circ C$$

$$\alpha_s = (9,4 \pm 0,1) \times 10^{-8} m^2/s$$

- Con los valores de k y α obtenidos y el valor de la densidad $\rho = 922 \text{ kg/m}^3$ a 25 °C, interpolado de la tabla 3.2, se calcula el calor específico de la grasa, en el rango de temperaturas entre 20 y 40°C, el cual se puede expresar como:

$$C_p = (5800 \pm 200) J/^\circ C \text{ kg}$$

Por otra parte, se determina la conductividad térmica y la capacidad calorífica de la sustancia empleando las correlaciones y la composición centesimal de la grasa mencionadas y se obtienen los valores que a continuación, se detallan:

$$k = (0,20 \pm 0,01) W/m^\circ C$$

$$C_p = (2380 \pm 1) J/^\circ C \text{ kg}$$

En esta Tesis se asume que la conductividad y la difusividad térmicas no dependen de la temperatura, por lo que los valores obtenidos pueden considerarse un promedio en el intervalo de temperatura estudiado. Los valores obtenidos en la simulación están dentro del orden de los calculados con las expresiones analíticas.

En la bibliografía consultada sobre el proceso de fusión, dependiendo del PCM que se estudie y las condiciones en que se desarrolla la fusión de la sustancia, se suele caracterizar dicho proceso con algunos números adimensionales, como por ejemplo el intervalo del número de Rayleigh en que se trabaja. Con el valor de densidad, viscosidad y difusividad térmica determinados en este capítulo y los valores de temperatura obtenidos en las experiencias del proceso de fusión de la sustancia se estimó el valor del número de Rayleigh. El Ra para las experiencias realizadas en las etapas de transición a la convección y predominantemente convectivo varía de $2,5 \times 10^5$ a 5×10^5 .

- Considerando la etapa de calentamiento para los modelos 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 y 10 presentada en el capítulo 4, en el análisis de la evolución temporal de temperaturas se observa que la región superior de la cavidad registra valores de temperaturas superiores a los de la región inferior, fusionándose la sustancia en esta región con mayor rapidez. La transferencia convectiva se impone sobre la transferencia conductiva acelerando el proceso el proceso de fusión y deformando el avance del frente de fusión. Dependiendo de la potencia de calentamiento, de la cantidad de sustancia, en este caso del espesor de la muestra y el lapso de tiempo en que se prolonga la etapa de calentamiento, en la zona cercana al piso, la sustancia puede o no, llegar a fusionarse.
- Analizando la etapa de enfriamiento en los diferentes modelos, se puede visualizar en todas ellas el fenómeno de sub-enfriamiento, en algunos modelos más notables que en otros. Considerando un modelo particular se observa que el fenómeno es más notorio en la región central de la cavidad y disminuye cerca de los bordes, de modo que en el análisis se considera el perfil $T(x \sim L/2, H/2)$. En general, la temperatura de solidificación (T_{Sol}) se encuentra en el intervalo entre 32 y 42°C. En la siguiente tabla se muestra los valores aproximados de la temperatura de solidificación obtenidas de las medidas térmicas, para cada uno de los modelos.

Modelo	$T_{Sol}(^{\circ}C)$	Modelo	$T_{Sol}(^{\circ}C)$
2	33	6	36
3	37	7	37
4	36	8	37
5	42	10	39

Tabla 7.1. Valores de la temperatura de solidificación.

- Dependiendo de la geometría del modelo y la evolución del flujo en el tiempo, el proceso de fusión en una cavidad calentada desde una pared lateral, puede dividirse en tres etapas: régimen conductivo, transición conducción-convección y régimen convectivo. En el régimen puramente conductivo la frontera avanza paralela a la pared calentada formando una capa de espesor constante. En la etapa de transición del régimen conductivo al de convección natural, el frente de fusión (en la zona cercana al techo) se desplaza más rápidamente hacia la pared opuesta, provocando una deformación del mismo. Por último, la etapa de régimen de convección natural comienza cuando el frente de fusión (cercano al techo) alcanza la pared opuesta más fría. En el capítulo 4, subsección 4.3.2.3 se analizan estas etapas en base a las medidas térmicas y a los registros fotográficos del proceso. En el caso de las medidas térmicas, en los perfiles de temperaturas para el modelo 7 durante la etapa de calentamiento se definen estas etapas. Se puede observar que, al inicio del calentamiento, los perfiles para un x fijo a diferentes alturas son aproximadamente lineales muy próximos entre sí. Esto significa que el frente de fusión avanza paralelo a la pared calentada sin deformaciones: etapa predominantemente conductiva. Luego para un determinado tiempo, que depende del espesor de la muestra, los perfiles se separan y crecen rápidamente con el tiempo en la región superior cercana a la pared calentada, lo que produce la deformación del frente de fusión en dicha región. De esta manera se inicia la etapa de transición del régimen conductivo- convectivo, hasta que el frente de fusión alcanza la esquina superior de la pared opuesta más fría. A partir de este momento, la transferencia convectiva comienza a predominar sobre la conductiva, reforzando la deformación del frente de fusión en la región superior y acelerando el proceso de fusión. Esta etapa que se prolonga hasta el final de la etapa de calentamiento. Los registros fotográficos corroboran la existencia de estas etapas.
- Del análisis de los perfiles térmicos (caso 1 del capítulo 4) a diferentes alturas (techo: $y=17.5$, centro $y=9$, piso: $y=0.5$), para los modelos 3 y 5, a $x=1$ y 2 cm de la pared calentada y los correspondientes a los modelos 6, 7, 8 y 10 (caso2) a $x=2$ y 4cm de la pared caliente, se observa que en cada región mencionada(techo, centro y piso) los perfiles crecen desde el inicio del calentamiento con diferente pendiente: curva concava y mayor pendiente (perfil más cercano a la pared calentada) y curva convexa y menor pendiente (perfil más alejado de dicha pared). Generalmente, antes de finalizar la etapa de calentamiento se igualan las pendientes y la concavidad de la forma del perfil, tiende al de la pared calentada; esto ocurre a diferentes tiempos, que crece a medida que aumenta el espesor de la muestra. Esto ocurre a temperaturas mayores que T_F , uniformizándose la temperatura en la región considerada con la sustancia en estado líquido, excepto en algunos modelos en la región cercana al piso, en las que la sustancia todavía permanece en estado sólido. De este análisis también puede afirmarse que por transferencia convectiva, la sustancia de cambio de fase, se funde más rápidamente en la región superior

de la cavidad cercana a la pared caliente, cerca del techo, luego en la región central y por último la región próxima al piso, lo que coincide con los registros fotográficos que muestran la forma que tiene el frente de fusión.

- En la sección 5.1 del capítulo 5 se ensayaron los modelos 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 y 10 con la misma potencia por unidad de masa y potencias por unidad de área diferentes para cada local, de dichas experiencias se puede afirmar que:
 - ✓ En los modelos de menor espesor el proceso de fusión tarda más tiempo en comenzar, esto es, presentan una etapa puramente conductiva más prolongada, debido a que la potencia por unidad de área en estos locales es menor. Por otro lado, la etapa convectiva que finaliza cuando toda la sustancia termina de fundirse, ocurre en menor tiempo; debido a que la potencia por unidad de masa es la misma para todos los modelos.
 - ✓ La rapidez de avance de la frontera en la pared superior que varía entre $2,67 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ y $4,67 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$, dependiendo del espesor de la muestra. Dicha rapidez corresponde a la etapa de transición conducción-convección. Con respecto a la rapidez de avance de la frontera sobre la pared fría, se infiere que también depende del espesor de la muestra, siendo mayor para los recintos de menor espesor y disminuye a medida que el espesor aumenta.
 - ✓ La evolución temporal de la fracción de líquido para todas muestras ensayadas tiene una duración de aproximadamente cuatro horas (figura 5.9); se plantea a futuro correlacionar dichos valores con algún parámetro térmico como la temperatura en la superficie interna de la pared del recinto con condición de flujo de calor constante.
- En la sección 5.2 del capítulo 5 se calculan los gradientes verticales que se establecen en el interior de la sustancia, a partir de las medidas térmicas realizadas. Dichos valores muestran que es posible seguir la evolución del flujo convectivo en todas sus etapas. El comportamiento del gradiente vertical cercano a la pared caliente (valores pequeños, pero no nulos) responsable del establecimiento del flujo convectivo en las primeras horas del calentamiento refleja la etapa predominantemente conductiva. Dichos valores no nulos también revelan que desde el principio está presente y no puede ser despreciado. El crecimiento pronunciado de los mencionados gradientes a diferentes alturas muestra el inicio de la transición al régimen de convección natural. El decrecimiento de estos valores muestra la evolución del flujo convectivo que (con valores más pequeños) solo cesa cuando la sustancia se solidifica.
- Los valores alcanzados por los gradientes horizontales reflejan la propagación del fenómeno convectivo en esta dirección, se puede afirmar que en la zona cercana al techo

la rapidez de propagación y en definitiva el avance de la frontera es mayor, y decrece con la altura lo que está de acuerdo con los registros fotográficos mencionados. La anulación de los gradientes en esta dirección determina que la sustancia en dicha zona está completamente líquida y la temperatura tiende a uniformizarse.

- Los registros fotográficos tomados cada quince minutos para las potencias ensayadas revelan todas las etapas del desarrollo del flujo presentes en el proceso de fusión de la sustancia. La forma del avance de la frontera en el interior de la sustancia, no cambia con la relación de aspecto de la cavidad, ni con la potencia ensayada, es siempre curva y no puede ser aproximada en forma lineal con la posición vertical, ya que la pendiente depende de ella. El espesor de la capa fundida en la parte inferior de la cavidad a nivel de la base del recipiente ($y=0$) es prácticamente 0 o despreciable y se mantiene así durante todo el proceso; lo que puede significar que la transferencia conductiva es pequeña a nivel de la base del recipiente en comparación con la convectiva. Las fotografías también confirman que el flujo puede ser aproximado en forma bidimensional en el plano xy durante todo el proceso de fusión.
- En cuanto a la resolución numérica se ha utilizado el programa SIMUSOL, que permite evaluar el comportamiento térmico de diversos sistemas físicos, en particular, los problemas de transferencia de calor con y sin cambio de fase. En el capítulo 6, dicho programa permite evaluar de manera sencilla, diferentes correlaciones del coeficiente de transferencia convectivo consideradas, como así también la comparación con los datos experimentales de temperatura en los locales y en el PCM. La simulación realizada con este programa es una primera aproximación a la resolución numérica del problema planteado, donde solo se plantea un único nodo en el centro de los locales. Esto no nos permite determinar el campo de temperatura que se establece (debido a los procesos conductivos y de convección natural) en el interior del material que se funde, ni en los locales: acondicionado y sin acondicionar.
- Las grasas orgánicas de origen vegetal y animal, tienen propiedades físicas que las hacen adecuadas para llevar a cabo el acondicionamiento térmico de recintos para diversos usos, además de estar disponibles en plaza a costos razonables. Los resultados experimentales permiten inferir que la sustancia de cambio de fase empleada en este caso puede retrasar la onda térmica proveniente de una fuente de calor. En el anexo 4 se describe una aplicación posible del PCM estudiado: refrigeración pasiva de paneles fotovoltaicos.

ANEXO 1

Visualización del Proceso de fusión en diferentes geometrías y diferentes condiciones de calentamiento

1. Observaciones cualitativas del proceso de fusión

En el caso de cambio de fase del material en un recipiente de Petrie (de 0,15 m de diámetro), el calentamiento se realizó con una resistencia eléctrica de $20\ \Omega$, sobre la cual se coloca una plancha de hierro de 0,01 cm de espesor a fin de uniformizar la temperatura en la base del recipiente que contiene la muestra, se suministra una potencia constante de 180 W.

La muestra es calentada desde abajo, con la superficie superior en contacto con el ambiente a menor temperatura. Una foto del desarrollo de la experiencia se muestra en la Figura 1, donde se señalan los distintos elementos, así como también las fases líquida y sólida.

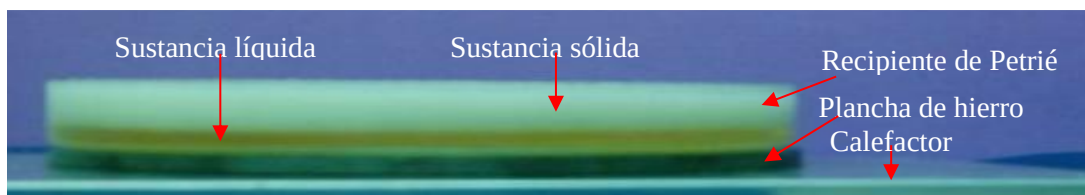


Figura 1-A1: Dispositivo experimental. Calentamiento de la muestra en un recipiente de Petrie.

La fusión comienza aproximadamente a los 30 minutos de iniciado el calentamiento y el sistema requiere otros 30 minutos para que la sustancia se encuentre completamente fundida. Cuando la muestra presenta los dos estados sólido y líquido, la temperatura registrada alrededor de la interfase es de aproximadamente 38°C y la temperatura en la grasa derretida en contacto con el fondo del recipiente es alrededor de 53°C . Al final del proceso cuando la muestra se encuentra completamente líquida su temperatura en el centro es de 41°C , en el fondo del recipiente de 57°C , estando las paredes laterales a 54°C .

En la Figura 1-A1 se observa que la sustancia comienza a fundirse desde el fondo del recipiente hacia la superficie en forma prácticamente homogénea, el sólido se encuentra sobre el líquido y la frontera avanza hacia arriba en la dirección vertical lo que podría llevar a pensar que tales sustancias presentan dilatación anómala. Este mismo efecto ocurre en los recipientes de base rectangular, tal como se aprecia en el Figura 2-A1, observándose que este hecho es independiente de que el mismo presente una superficie libre o se encuentre completamente sellado, en la mencionada figura se señala el calefactor y la sustancia en ambos estados. La forma del avance de la frontera es la misma, ya sea que el recipiente tenga la superficie libre o se encuentre completamente sellada.

Cuando la sustancia se halla totalmente líquida y comienza a solidificarse por contacto con el ambiente o por inmersión en un baño a baja temperatura, se aprecia que solidifica desde la parte inferior, es decir el sólido se encuentra por debajo del líquido. Esta situación se explica considerando que la sustancia al ser calentada por debajo y al tener una viscosidad alta, el movimiento del fluido se dificulta quedando claramente separadas ambas fases por la superficie de separación: interface.

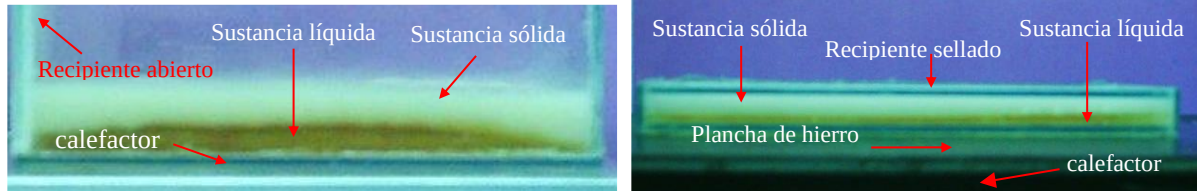


Figura 2-A1: Calentamiento de la muestra. Geometría rectangular. Superficie libre y sellada.

2. Visualización de la evolución temporal de la interfase

2.1. Calentamiento inferior

2.1.1. Recinto de base circular

En la etapa de calentamiento, en el caso de los recipientes de Petri, por la calidad del vidrio se visualizan claramente las fases (líquida y sólida) y la superficie de separación entre ambas. Como se muestra en la Figura 3-A1 a), b), c), d), e) y f)) no se aprecian efectos convectivos, y puede observarse el avance del frente de fusión desde la base hacia la superficie externa.

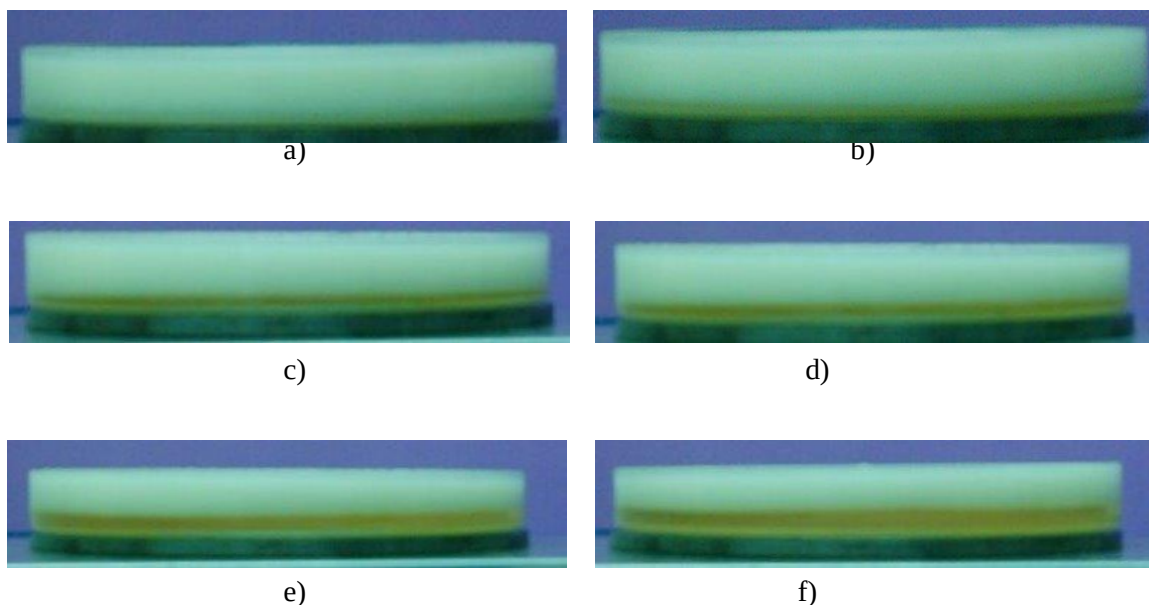


Figura 3-A1: Proceso de calentamiento desde la base, geometría cilíndrica.

2.1.2. Recintos de base rectangular

Esta observación que se repite si la geometría es de base rectangular como se muestra en la Figura 4-A1, permite ajustar el comportamiento de la sustancia de cambio de fase con un modelo conductivo.

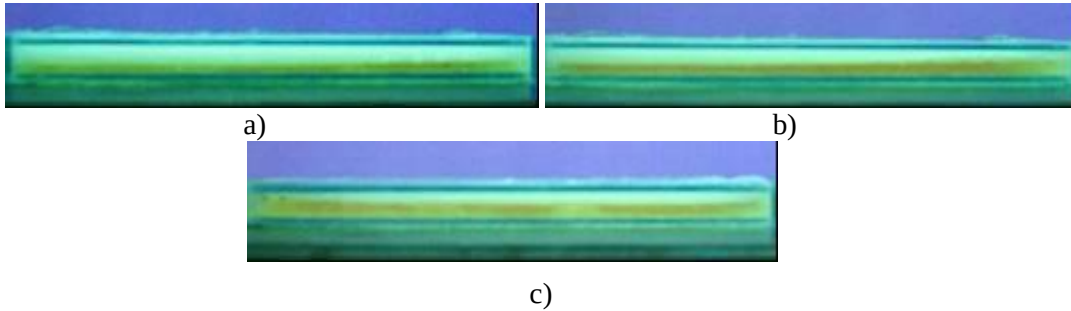


Figura 4-A1: Proceso de calentamiento desde la base, geometría rectangular.

Cuando los recintos son más altos que anchos y son enfriados o calentados desde abajo se observa lo que ya se explicó anteriormente: la sustancia se solidifica desde la parte inferior, es decir el sólido se encuentra por debajo del líquido, tal como se aprecia en la Figura 5-A1 a), b), c) y d) que corresponden a las etapas inicial y final del proceso de enfriamiento desde su base, mientras que las partes e), f), g) y h) a las etapas inicial y final del proceso de calentamiento desde su base.

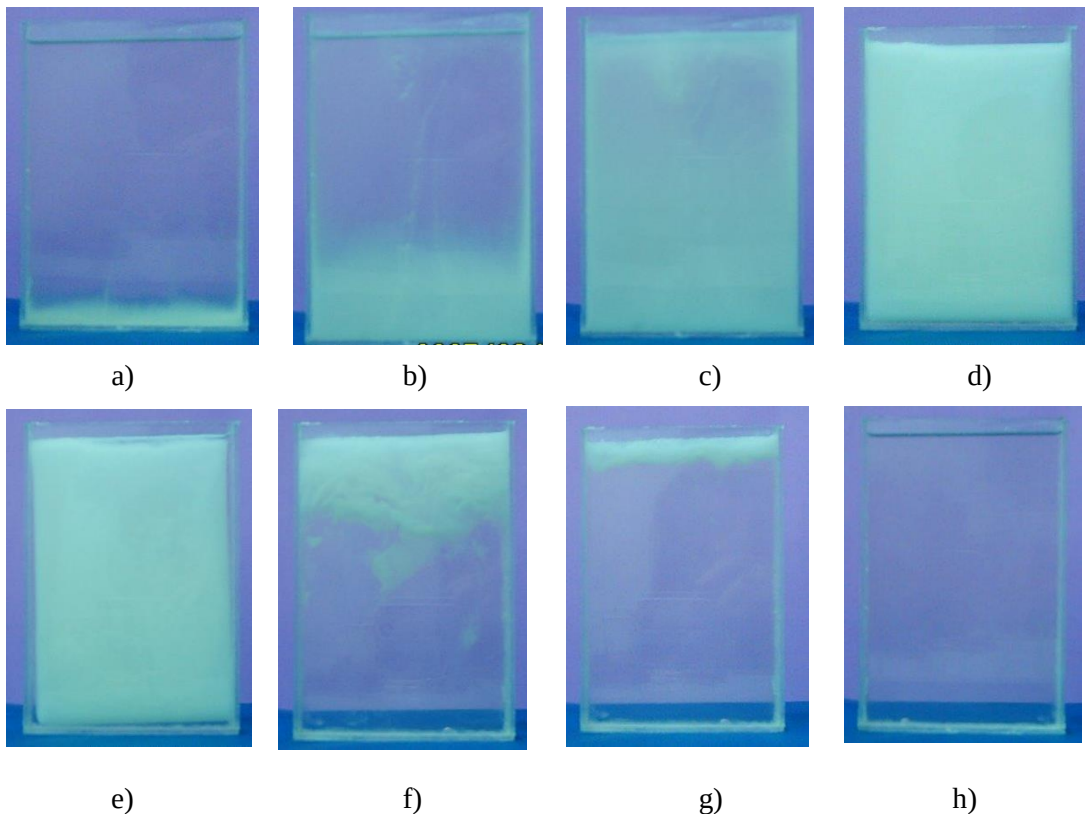


Figura 5-A1: Posición del sólido al ser enfriado o calentado desde la base.

2.2. Calentamiento lateral. Recinto de base rectangular



Figura 6-A1: Dispositivo en una geometría rectangular con calentamiento desde una pared lateral.

Se realizaron ensayos para esta misma geometría con calentamiento desde una pared lateral, como se muestra en la Figura 6-A1, en ella se observa que en la zona próxima a la pared calentada la grasa se funde formando una delgada capa de espesor casi homogéneo en la dirección vertical, la interfase avanza paralela a la superficie calentada, en estas observaciones preliminares no observa efectos convectivos importantes que se reflejen en la forma del avance del frente de fusión.

ANEXO 2

Determinación de la densidad, conductividad y difusividad térmica.

Estimación de la Capacidad Calorífica

En el estudio de las propiedades de la grasa bovina se parte de un trabajo (Vilte y Bouciguez, 2008), en el cual se determina la densidad de la sustancia de cambio de fase por pesada, con una probeta, que fue llenada con sustancia líquida enrasada a una altura de 0,007m, 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 observaron diferencias apreciables entre el volumen de la muestra en el estado sólido y el líquido.

Para la determinación de la conductividad térmica, la difusividad y el calor específico, se ensayaron experiencias de ciclos de calentamiento y enfriamiento de la sustancia y se empleó la Ley de Fourier de transmisión del calor por conducción a través de la muestra, cuya expresión es la ecuación (3)

$$q'' = -k A \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (3)$$

Donde k es la conductividad del material de cambio de fase, $\Delta T = T_{fondo} - T_{med}$ son dos valores de temperatura medidos dentro de la muestra y Δx es la distancia entre los sensores en las posiciones x_{med} y x_{fondo} dentro de la muestra ($|\Delta x| = 0,01$ cm); A es el área total que recibe el calor, que en este caso $0,09 \text{ m}^2$. El flujo de calor q, se determina a través de la potencia eléctrica aplicada, siendo ésta igual a 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, a fin de asegurarse de 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 se dan en las ecuaciones (4) y (5) respectivamente.

$$k_S = (0,57 \pm 0,01) \frac{W}{^{\circ}Cm} \quad (4)$$

$$k_L = (0,95 \pm 0,01) \frac{W}{^{\circ}Cm} \quad (5)$$

La difusividad térmica (α) y la capacidad calorífica (C) de una sustancia se encuentran estrechamente relacionadas a través de la ecuación (6)

$$\alpha = \frac{k}{C \rho} \quad (6)$$

Físicamente, α indica como fluye el calor por el material: cuanto más alta es, mayor es el ritmo de propagación del perfil de temperatura. Es decir, α relaciona flujo de energía con gradiente de energía, 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)

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

Donde T(x,t) es la temperatura, función de la coordenada espacial, x y la temporal t.

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 nos queda la expresión (8) donde el primer índice indica variación espacial y el segundo índice la temporal, siendo $\Delta t=30$ s y $\Delta x=0,01$ m.

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

Los valores obtenidos presentan una dispersión importante y oscilan alrededor de un valor medio dado por (9) para el sólido y (10) para el líquido respectivamente.

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

$$\alpha_L = (1,6 \pm 0,9) \times 10^{-7} \frac{m^2}{s} \quad (10)$$

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), estando expresados por las ecuaciones (11) y (12) respectivamente:

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

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

ANEXO 3

Sistema de calentamiento: aspectos relativos a la construcción, disposición y homogeneidad del flujo de calor generado

Para las experiencias de la sección 4.3 del capítulo 4, sección 5.1 del capítulo 5 y capítulo 6 se construyó un calefactor eléctrico que consiste en un devanado de constantan sobre una placa de resina epoxi de $0,12 \times 0,18$ m de superficie, generando una resistencia de 26Ω . En la figura 1-A3, izquierda, se muestra una foto del mismo y a la derecha el calefactor, las láminas de aislación eléctrica y la placa de aluminio, que forman parte del sistema de calentamiento. Se puede observar que el devanado es bastante homogéneo, denso y prolijo cubriendo toda la superficie. Una vez obtenido el devanado se aplica una capa delgada y transparente de acrílico de secado rápido, como aislante eléctrico. Las hojas de mica utilizadas en las aplicaciones eléctricas, resisten altas temperaturas y se emplean como separadores y aislante eléctrico entre el devanado y la placa de aluminio. Esta última tiene como función uniformizar la temperatura en la superficie de la cavidad calentada.

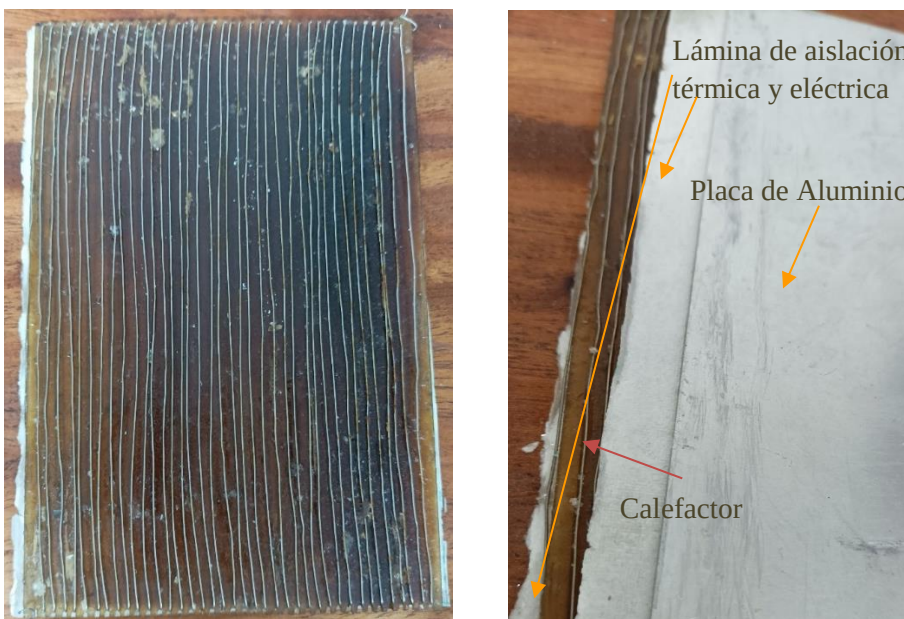


Figura 1-A3: Izquierda: Calefactor. Derecha: calefactor, aislación eléctrica y placa de aluminio.

En la figura 2-A3 se muestra un esquema de la disposición de los elementos del sistema de calentamiento con los recintos que contienen el material de cambio de fase.

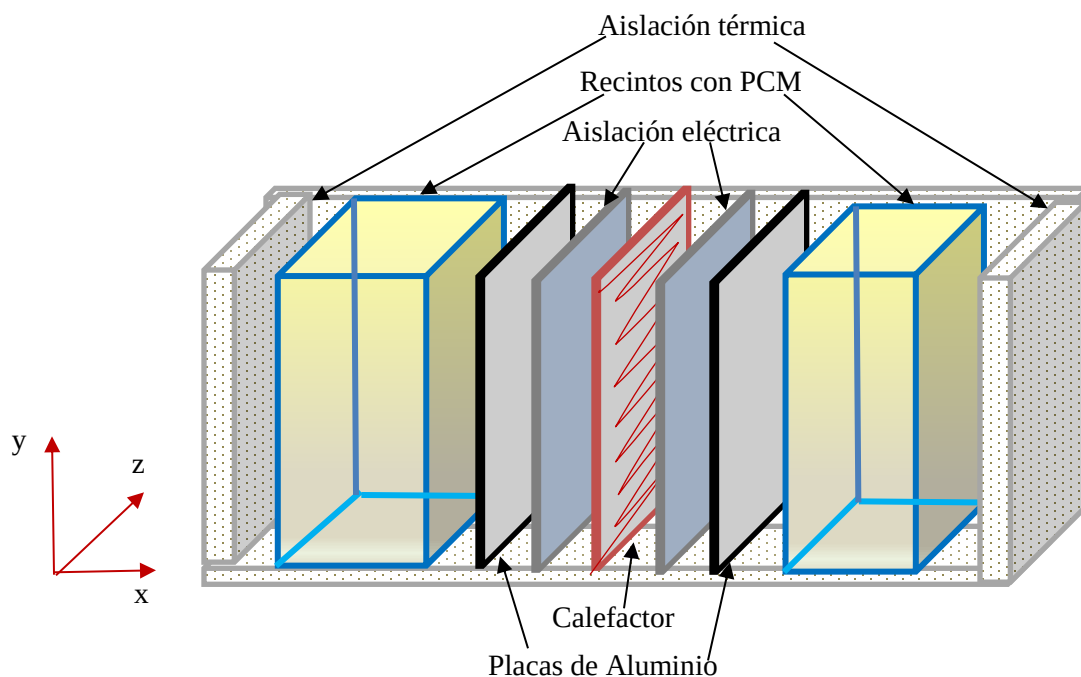


Figura 2-A3: Esquema del dispositivo experimental

En la figura 3-A3 se muestra una foto del sistema completo, en el que puede apreciarse un sistema que consiste en una base de madera sobre la cual se ubican con tornillos regulables dos soportes que permiten mantener alineados verticalmente todos los elementos y asegurar el correcto y adecuado contacto entre el sistema de calentamiento, los recintos y la aislación.



Figura 3-A3: Izquierda: Dispositivo experimental empleado en los ensayos. Derecha: Sensores de temperatura en la parte superior, centro e inferior del calefactor.

A fin de corroborar la homogeneidad de la superficie calentada se procede a realizar medidas térmicas para una potencia dada sobre la superficie de la placa de aluminio en la región superior, centro e inferior de la misma (figura 3-A3).

En la figura 4-A3 se muestra la evolución temporal de dichas temperaturas en un rango usual de ensayo. Se puede observar que los valores de temperatura son muy próximos entre sí con diferencias que se encuentran dentro del error experimental, lo que justifica asignar la temperatura en el centro de la placa como la temperatura de la placa.

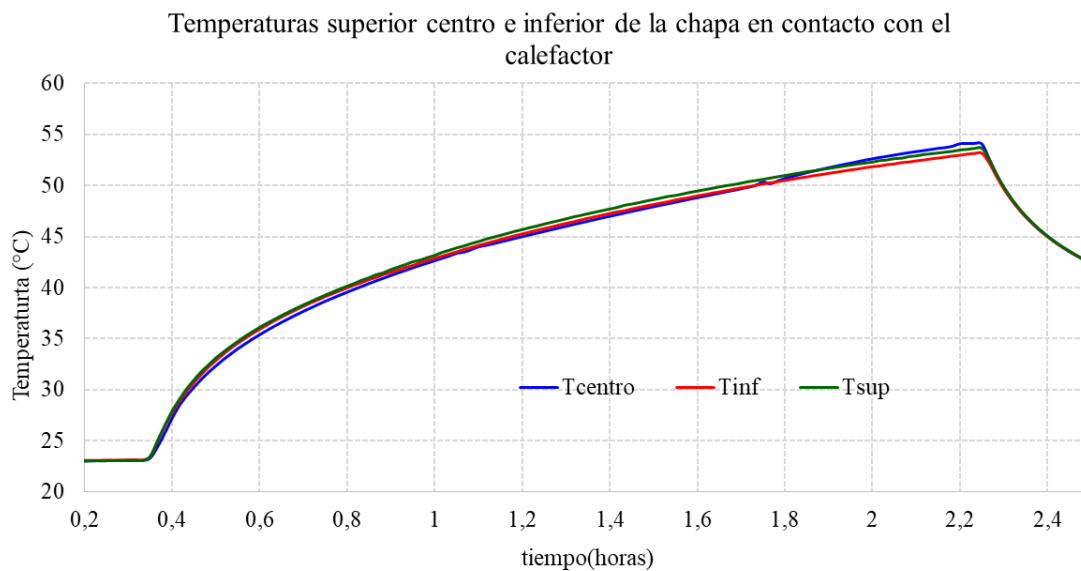


Figura 4-A3: Evolución temporal de temperaturas en la placa de aluminio calentada en contacto con los recintos.

ANEXO 4

Aplicación: refrigeración pasiva de paneles fotovoltaicos empleando el material de cambio de fase estudiado: primer jugo bovino

Los PCM tienen una alta capacidad para almacenar energía en forma de calor latente y en un rango estrecho de temperatura. Esta propiedad se puede aprovechar en múltiples aplicaciones ya que puede almacenar energía térmica en forma de calor latente, de la que se puede disponer después y también actuar como termorreguladores limitando la dependencia con los sistemas de climatización, reduciendo así el consumo energético (Mohamed et al, 2017).

A partir del estudio realizado en este trabajo de Tesis, la grasa vacuna o primer jugo bovino es un material de cambio de fase con las siguientes propiedades:

Temperatura de fusión: $33^{\circ}\text{C} < T_F < 38^{\circ}\text{C}$

Conductividad Térmica: $0,5\text{W/m K}$

Capacidad Calorífica: $5800\text{ J/kg }^{\circ}\text{C}$

Calor Latente de fusión: 101.050 J/kg

Difusividad Térmica: $9,5 \times 10^{-8}\text{ m}^2/\text{s}$

La posibilidad de los materiales de cambio de fase de controlar la temperatura de las superficies calientes, ha generado estudios sobre el uso de PCM para la regulación térmica de sistemas fotovoltaicos.

Un panel solar fotovoltaico es un dispositivo diseñado para convertir la energía solar en electricidad. La energía eléctrica generada mediante paneles solares fotovoltaicos es inagotable y no emite gases de efecto invernadero, por lo que no contribuye al calentamiento global. De hecho, se muestra como una de las tecnologías renovables más eficientes en la lucha contra el cambio climático.

La eficiencia operativa de los paneles solares fotovoltaicos se ve afectada por diversos factores como la intensidad de la radiación solar incidente y la temperatura de trabajo de las celdas semiconductoras. La energía térmica absorbida aumenta la temperatura del módulo, lo que afecta su rendimiento. En efecto el rendimiento del panel fotovoltaico disminuye a medida que aumenta la temperatura de la superficie. (Kant et al, 2016) La reducción de la eficiencia relativa es de alrededor del 0,45 % con un aumento de 1°C sobre la temperatura de funcionamiento diseñada de 25°C (Skoplaki E. y Palyvos J.A., 2009). Para aumentar la eficiencia del panel fotovoltaico, es necesario disminuir la temperatura del mismo usando

técnicas de enfriamiento activas, pasivas o híbridas (Maghrabie et al, 2023). El uso de materiales de cambio de fase ofrece la posibilidad de una estrategia pasiva muy interesante.

El uso de materiales de cambio de fase PCM es una de las herramientas más prometedoras hoy en día para reducir y regular la temperatura de un panel fotovoltaico, aumentando su eficiencia eléctrica. La investigación actual estudia la inclusión del PCM y se analizan los cambios originados en el comportamiento térmico y el rendimiento eléctrico, del panel fotovoltaico.

Para asegurar un comportamiento adecuado del sistema PV/PCM, se debe seleccionar entre las posibles alternativas el PCM más conveniente en función de sus características. Por un lado, un factor primordial en dicha selección es la temperatura de fusión, T_F , que caracteriza el comportamiento como acumulador o liberador de energía térmica. Por otro lado, el calor latente de fusión (L) define principalmente la capacidad del sistema para acumular la energía térmica transferida a la capa de PCM (Mohamed et al, 2017). La conductividad térmica de los PCM orgánicos en general es baja (conductividad de 0,18 W/mK, por ejemplo en el caso de parafina), este valor puede ser incrementado combinando el PCM puro con por ejemplo polvo de cobre y grafito con proporciones de masa del 70 %, 20 % y 10 % respectivamente (conductividad de 95,38 W/mK) (Hachem et al, 2017). El PCM combinado mejora la transferencia de calor entre el panel fotovoltaico y el contenedor PCM y por lo tanto disminuye la temperatura del panel fotovoltaico y aumenta su eficiencia más que el PCM puro. En vistas a mejorar la disipación de energía se estudia, también, la inclusión de aletas de diferentes tipos en el contenedor del material de cambio de fase. (Elsafi A. M. y Gandhidasan P., 2015).

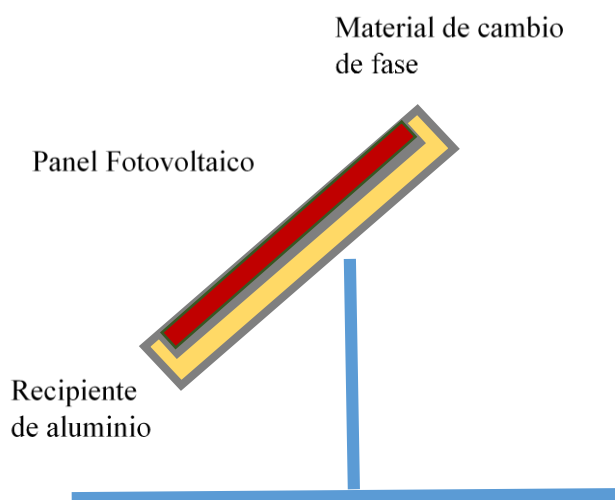


Figura 1-A4: Sistema Panel Fotovoltaico-PCM.

En la Figura 1-A4 se muestra un esquema del empleo de la grasa vacuna estudiada como termorregulador de la temperatura de operación de un panel fotovoltaico. Se observa que el

material de cambio de fase se ubica el parte posterior del panel fotovoltaico, contenido por ejemplo en un recipiente de aluminio que puede estar recubierto con una capa de silicona o espuma de poliuretano a fin de evitar posibles fugas del PCM cuando alcance el estado líquido durante los picos de radiación diaria (Maghrabie et al, 2023).

Se debería estudiar o analizar el espesor más adecuado de PCM, la inclusión de otros materiales para lograr un PCM combinado que optimice las condiciones del panel fotovoltaico en cuanto al intervalo de tiempo en que mantiene estable la temperatura de operación del panel y la rapidez de evacuación de la energía térmica a fin de evitar la formación de puntos calientes. Con respecto al segundo aspecto, se podría considerar la inclusión de aletas en el recipiente que contiene el material de cambio de fase.

Bibliografía

1. Elsafi A. M., Gandhidasan P. Comparative study of double-pass flat and compound parabolic concentrated photovoltaic–thermal systems with and without fins. *Energy Conversion and Management* 98 (2015) 59–68.
2. Hachem F., Abdulhay B., Ramadan M., El Hage H., El Rab M. G., Khaled M. Improving the performance of photovoltaic cells using pure and combined phase change materials e Experiments and transient energy balance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 70 (2017) 567–575.
3. Kant K., Shukla A., Sharma A., Biwole P. H. Heat transfer studies of photovoltaic panel coupled with phase change material. *Solar Energy* 140 (2016) 151–161
4. Khanna S., Reddy K.S., Mallick T. K. Optimization of finned solar photovoltaic phase change material (finned pv pcm) system. *International Journal of Thermal Sciences* 130 (2018) 313–322.
5. Maghrabie H. M., Mohamed A.S.A., Fahmy A. M., Abdel Samee A. A. Performance enhancement of PV panels using phase change material (PCM): An experimental implementation. *Case Studies in Thermal Engineering* 42 (2023) 102741.
6. Skoplaki E., Palyvos J.A. On the temperature dependence of photo-voltaic module electrical performance: a review of efficiency/power correlations, *Solar Energy* 83 (2009) 614-624.

Índice de Tablas

Tabla 3.1	Propiedades de la grasa vacuna.	26
Tabla 3.2	Composición de la grasa vacuna según la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación).	27
Tabla 3.3	Densidad de la grasa orgánica y sus componentes en función de la temperatura.	29
Tabla 3.4	Valores de viscosidad obtenidos en laboratorio.	31
Tabla 3.5	Valores de parámetros térmicos y densidad de flujo de calor.	37
Tabla 3.6	Valores de los coeficientes de la matriz de sensibilidad.	37
Tabla 3.7	Valores determinados de flujo y densidad del flujo de calor.	40
Tabla 3.8	Valores estimados de conductividad y difusividad térmicas.	41
Tabla 3.9	Valores estimados de conductividad y difusividad térmicas para diferentes valores de conjetura inicial.	41
Tabla 4.1	Información de los modelos ensayados.	45
Tabla 4.2	Información detallada de los modelos ensayados en el Caso 1.	47
Tabla 4.3	Información detallada de los modelos ensayados en el Caso 2.	58
Tabla 5.1	Información detallada de los modelos ensayados.	71
Tabla 5.2	Tiempos característicos del proceso de fusión y rapidez de avance en la etapa convectiva.	77
Tabla .5.3	Información detallada de los modelos 1 y 2 ensayados.	82
Tabla 5.4	Valores máximos de gradientes horizontales.	91
Tabla 5.5	Valores máximos de gradientes verticales.	93
Tabla 6.1	Información general de los recintos empleados en las experiencias.	98
Tabla 6.2	Notación y ubicación de los sensores empleados en las experiencias.	100
Tabla 6.3	Condiciones de las experiencias realizadas.	101
Tabla 6.4	Descripción de los nodos de temperatura del diagrama de la figura 6.7.	106
Tabla 7.1.	Valores de la temperatura de solidificación.	114

Índice de Figuras

Figura 1.1	La frontera libre en un vaso con hielo.	12
Figura 1.2	Esquema del Problema de Stefan a una fase.	13
Figura 1.3	Esquema del Problema de Stefan a dos fases.	13
Figura 1.4	Comportamiento térmico de los materiales de cambio de fase.	15
Figura 1.5	Comportamiento de los materiales de cambio de fase ante la oferta y la demanda de energía.	15
Figura 1.6	Clasificación de materiales de cambio de fase.	16
Figura 1.7	Ventajas técnicas y económicas de materiales de cambio de fase orgánicos e inorgánicos.	17
Figura 2.1	Esquema del modelo matemático y el sistema de coordenadas.	19
Figura 2.2	Modelo físico del desarrollo del proceso de fusión.	20
Figura 3.1	Sustancia de cambio de fase estudiada (primer jugo bovino).	25
Figura 3.2	Expresiones para la densidad de los componentes de los alimentos en función de la temperatura. (Choi y Okos, 1986).	28
Figura 3.3	Izquierda: Esquema de la experiencia Derecha: Varilla, sustancia ensayada y esferas de acero empleadas.	30
Figura 3.4	Calorimetría diferencial de barrido con modulación para una grasa orgánica.	33
Figura 3.5	Evolución temporal de temperaturas a diferentes alturas (y) en la cavidad (x=5cm).	34
Figura 3.6	Esquema del Problema planteado.	35
Figura 3.7	Contenedor con la muestra de grasa, disposición de los sensores.	40
Figura 4.1	Izquierda: Dispositivo experimental que se emplea en los ensayos. Derecha: Recintos, calefactor y aislación.	47
Figura 4.2	Dispositivo experimental: fuente, sensores de temperatura, registro de datos, recinto y aislación.	49
Figura 4.3	Esquema de la disposición de los sensores térmicos.	50
Figura 4.4	Proceso de calentamiento desde la pared lateral, para los modelos estudiados.	50
Figura 4.5	Evolución temporal de temperaturas en los recintos 2 y 4 durante el proceso de calentamiento y enfriamiento.	51

Figura 4.6	Evolución temporal de temperaturas, proceso. de calentamiento y enfriamiento. a: recinto 3 y b: recinto 5.	52
Figura 4.7	Evolución temporal de las temperaturas en el modelo 3. a: $x=1$ cm y b: $x=2$ cm.	53
Figura 4.8	Evolución temporal de las temperaturas en el modelo 4. a: $x=1$ cm y b: $x=2$ cm.	53
Figura 4.9	Evolución temporal de las temperaturas, modelo 5. a: $x=1$ cm, b: $x=2$ cm.	54
Figura 4.10	Evolución temporal de las temperaturas en el techo ($y=17,5$ cm), $x=1$ cm y $x=2$ cm. a: modelo 3; b: modelo 5.	54
Figura 4.11	Evolución temporal de las temperaturas en el centro ($y=9$ cm), $x=1$ cm y $x=2$ cm. a: modelo 3; b: modelo 5.	55
Figura 4.12	Evolución temporal de las temperaturas en el piso ($y=0,5$ cm), $x=1$ cm y $x=2$ cm. a: modelo 3; b: modelo 5.	55
Figura 4.13	Fotografía del dispositivo experimental, mostrando todos los elementos utilizados.	58
Figura 4.14	Esquema de la ubicación de los sensores térmicos y dirección del flujo de calor.	59
Figura 4.15	Evolución de los valores de temperatura en la pared caliente. Modelos 6 y 7.	60
Figura 4.16	Evolución de los valores de temperatura en el interior de los modelos 6 y 7.	60
Figura 4.17	Evolución temporal de temperatura a 2 y 4 cm de la pared calentada, región del techo ($y=17,5$ cm), modelos 6 y 7.	61
Figura 4.18	Evolución temporal de temperaturas a 2 y 4 cm de la pared calentada, región central ($y=9$ cm), modelos 6 y 7.	61
Figura 4.19	Evolución temporal de temperatura a 2 y 4 cm de la pared calentada, región del piso ($y=0,5$ cm), modelos 6 y 7.	62
Figura 4.20	Evolución temporal de temperaturas, modelos 8 y 10 durante las etapas de calentamiento y enfriamiento.	63
Figura 4.21	Evolución temporal de temperaturas a 2 y 4 cm de la pared calentada, región del techo ($y=17,5$ cm), modelos 8 y 10.	63
Figura 4.22	Evolución temporal de temperaturas a 2 y 4 cm de la pared calentada,	64

	región central ($y=9$ cm), modelos 8 y 10.	
Figura 4.23:	Evolución temporal de temperaturas a 2 y 4 cm de la pared calentada, región del piso ($y=0,5$ cm) en los modelos 8 y 10.	65
Figura 4.24	Registros fotográficos de la evolución temporal del proceso de fusión de una sustancia de cambio de fase. Modelos 6 y 7.	66
Figura 4.25	Evolución temporal de las temperaturas en el modelo 7, $x=2$ cm.	67
Figura 4.26	Evolución temporal de las temperaturas en el modelo 7, $x=4$ cm.	68
Figura 4.27	Evolución temporal de la fracción de líquido, modelos 6 y 7.	68
Figura 5.1	a) Partes del dispositivo experimental. b) Posición de las termocuplas y el sistema de referencia utilizado.	72
Figura 5.2	Dispositivo experimental.	73
Figura 5.3	a) Imagen original y b) imagen binarizada.	74
Figura 5.4	Evolución temporal de los perfiles de la interface.	75
Figura 5.5	Evolución temporal del frente de fusión en la pared superior. Modelos 2, 3, 4 y 5.	76
Figura 5.6	Evolución temporal del frente de fusión en la pared superior. Modelos 6, 7, 8 y 10.	76
Figura 5.7	Evolución temporal del frente de fusión en la pared fría. Modelos 2, 3, 4 y 5.	78
Figura 5.8	Evolución temporal del frente de fusión en la pared fría. Modelos 6, 7, 8 y 10.	78
Figura 5.9	Fracción de líquido en función del tiempo.	79
Figura 5.10	Ubicación de los sensores térmicos y la dirección del flujo de calor.	81
Figura 5.11	Evolución temporal de temperaturas en las paredes del modelo 2.	83
Figura 5.12	Evolución temporal de temperaturas, cerca de la pared calentada. $x=1$ cm.	84
Figura 5.13	Evolución temporal de temperaturas en un plano vertical en el centro del recinto.	84
Figura 5.14	Evolución temporal de temperaturas, cerca de la pared fría. $x=5$ cm.	85
Figura 5.15	Evolución temporal de temperaturas, cerca de la pared superior $y=5$ cm.	86
Figura 5.16	Evolución temporal de temperaturas en un plano horizontal	86

	a 10 cm de la pared superior. ⁸⁴	
Figura 5.17	Evolución temporal de temperaturas en un plano horizontal en el centro del recinto.	87
Figura 5.18	Fenómeno de sub-enfriamiento en la sustancia de cambio de fase.	88
Figura 5.19	Gradientes de temperaturas horizontales a $y=5\text{cm}$.	89
Figura 5.20	Gradientes de temperaturas horizontales a $y=10\text{ cm}$.	90
Figura 5.21	Gradientes de temperaturas horizontales a $y=15\text{ cm}$.	91
Figura 5.22	Gradientes de temperaturas verticales a $x=1\text{ cm}$.	92
Figura 5.23	Gradientes de temperaturas verticales a $x=3\text{ cm}$.	92
Figura 5.24	Gradientes de temperaturas verticales a $x=5\text{ cm}$.	93
Figura 5.25	Evolución temporal del proceso de fusión en una grasa orgánica.	94
Figura 5.26	Visualización del frente de fusión en una sustancia orgánica con calentamiento lateral.	95
Figura 5.27	Procesamiento digital de las fotografías del proceso de fusión para diferentes relaciones de aspecto y/x . a: $H/L=0.24$, b: $H/L=0.5$ y c: $H/L=0.2$.	95
Figura 5.28	Evolución temporal de la fracción de líquido para dos valores de potencia en el Modelo 1.	96
Figura 5.29	Evolución temporal de la fracción líquida para los modelos 1 y 2 (potencia de $17,5\text{ W}$).	97
Figura 6.1	Dispositivo experimental. Recintos, PCM, calefactor y sensores de temperatura.	99
Figura 6.2	Esquema de la disposición de los sensores térmicos en los recintos.	100
Figura 6.3	Evolución de temperaturas en los recintos de la experiencia 1.	101
Figura 6.4	Evolución de temperaturas en los recintos de la experiencia 2.	102
Figura 6.5	Correlaciones para los coeficientes de transferencia convectiva Experiencia 1.	104
Figura 6.6	Elementos empleados por el programa DIA.	105
Figura 6.7	Diagrama del circuito propuesto para la Experiencia 1.	106
Figura 6.8	Cuadros de datos para la Experiencia 1.	108
Figura 6.9	Resultados experimentales y simulados de la temperatura Experiencia 1.	109
Figura 6.10	Resultados experimentales y simulados de la temperatura.	110

Experiencia 2.		
Figura 1-A1.	Dispositivo experimental. Calentamiento de la muestra en un recipiente de Petrie.	118
Figura 2-A1.	Calentamiento de la muestra. Geometría rectangular. Superficie libre y sellada.	119
Figura 3-A1.	Proceso de calentamiento desde la base, geometría cilíndrica.	119
Figura 4-A1	Proceso de calentamiento desde la base, geometría rectangular.	120
Figura 5-A1	Posición del sólido al ser enfriado o calentado desde la base.	120
Figura 6-A1	Dispositivo en una geometría rectangular con calentamiento desde una pared lateral.	121
Figura 1-A3	<u>Izquierda:</u> Calefactor. <u>Derecha:</u> calefactor, aislación eléctrica y placa de aluminio.	124
Figura 2-A3	Esquema del dispositivo experimental.	125
Figura 3-A3	<u>Izquierda:</u> Dispositivo experimental empleado en los ensayos. <u>Derecha:</u> Sensores de temperatura en la parte superior, centro e inferior del calefactor.	125
Figura 4-A3	Evolución temporal de temperaturas en la placa de aluminio calentada en contacto con los recintos.	126
Figura 1-A4:	Sistema Panel Fotovoltaico-PCM.	128