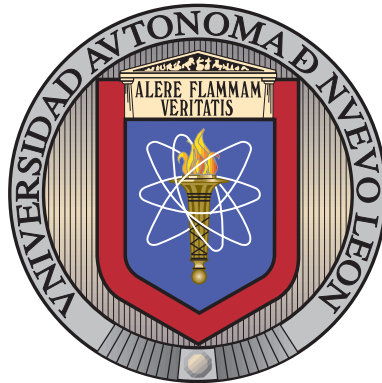


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA



EFFECTO DE LA VARIACIÓN DE LAS PROPIEDADES
TERMOFÍSICAS EN PCMs SOBRE LA RAPIDEZ DE
FUSIÓN DENTRO DE CAVIDADES CERRADAS BAJO
CONDICIONES DE TEMPERATURA DE
CONGELACIÓN USANDO PIV

POR

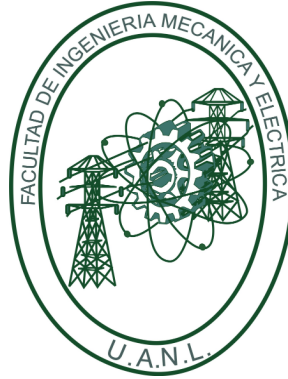
JONATHAN ISAÍ LÓPEZ GARCÍA

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CON ORIENTACIÓN EN ENERGÍAS TÉRMICA Y RENOVABLE

9 DE OCTUBRE DE 2023

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA



EFFECTO DE LA VARIACIÓN DE LAS PROPIEDADES
TERMOFÍSICAS EN PCMs SOBRE LA RAPIDEZ DE
FUSIÓN DENTRO DE CAVIDADES CERRADAS BAJO
CONDICIONES DE TEMPERATURA DE
CONGELACIÓN USANDO PIV

POR

JONATHAN ISAÍ LÓPEZ GARCÍA

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CON ORIENTACIÓN EN ENERGÍAS TÉRMICA Y RENOVABLE

9 DE OCTUBRE DE 2023

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Posgrado

Los miembros del Comité de Evaluación de Tesis recomendamos que la Tesis “Efecto de la variación de las propiedades termofísicas en PCMs sobre la rapidez de fusión dentro de cavidades cerradas bajo condiciones de temperatura de congelación usando PIV”, realizada por el estudiante Jonathan Isai López García, con número de matrícula 1580034, sea aceptada para su defensa como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Ciencias de la Ingeniería con Orientación en Energías Térmica y Renovable.

El Comité de Evaluación de Tesis

Dr. Daniel de la Rosa Urbalejo
Director

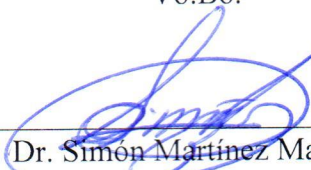
Dr. Fausto Alejandro Sánchez Cruz
Co-Director

Dr. Santos Méndez Díaz
Revisor

Dr. Hugo Guadalupe Ramírez Hernández
Revisor

M.C. Jesús Juárez Ramírez
Revisor

Vo.Bo.



Dr. Simón Martínez Martínez
Subdirector de Estudios de Posgrado



Institución 190001

Programa 507507

Acta Núm. 4247

Ciudad Universitaria, a 26 de septiembre de 2023.

ÍNDICE GENERAL

Nomenclatura	XIV
Agradecimientos	XVII
Resumen	XX
1. Introducción	1
1.1. Motivación	2
1.2. Antecedentes	4
1.2.1. Planteamiento del problema	7
1.3. Hipótesis	7
1.4. Objetivos	8
1.4.1. Objetivo general	8
1.4.2. Objetivos específicos	8
2. Marco teórico	9
2.1. Almacenamiento de energía	9

2.2. Materiales de cambio de fase	11
2.2.1. Clasificación de los PCMs	12
2.2.2. Propiedades físicas	14
2.2.3. Propiedades cinemáticas	14
2.2.4. Propiedades químicas	14
2.2.5. Refrigerantes secundarios	15
2.2.6. Aplicaciones a bajas temperaturas	20
2.2.7. Frente fusión bajo convección natural	22
3. Metodología	28
3.1. Metodología general	28
3.2. Simulación dinámica de fluidos computacional	29
3.2.1. PCMs a utilizar	29
3.2.2. Modelo geométrico	35
3.2.3. Ecuaciones de gobierno	36
3.2.4. Modelo numérico	40
3.2.5. Validación del modelo numérico	41
3.3. Metodología experimental	45
3.3.1. Modelo 3D conceptual de la caja de aislante y la cavidad	45
3.3.2. Sistema de refrigeración	48
3.3.3. Construcción del banco experimental	53

3.3.4. Adquisición de datos	59
3.3.5. Pruebas preliminares para puesta a punto del banco de pruebas	62
3.3.6. Prueba de fusión	71
3.3.7. Medición del campo de temperaturas	74
3.3.8. Aplicación de la Velocimetría por Imágenes de Partículas (PIV)	76
4. Resultados y Discusión	80
4.1. Simulación computacional	81
4.1.1. Frente de fusión	81
4.1.2. Transferencia de calor	83
4.1.3. Campo de velocidades	86
4.2. Resultados experimentales	91
4.2.1. Frente de fusión	91
4.2.2. Transferencia de calor	97
4.2.3. Campo de velocidades	103
5. Conclusiones	112

ÍNDICE DE FIGURAS

2.1. Clasificación de los PCMs	13
2.2. Propiedades termofísicas de salmuera de NaCl [4].	18
2.3. Diagrama de fase de la salmuera de NaCl a 100kPa [45].	19
2.4. Régimen de fusión en presencia de convección natural cuando el PCM se calienta de un lado [5].	24
2.5. Desarrollo de una capa líquida de poca profundidad que invade en la parte superior de una bloque de n-octadecano calentado desde la derecha [5].	25
2.6. Zona líquida (A_2) junto con una capa horizontal que invade (A_1) al momento de ser calentada desde la derecha [5].	26
3.1. Metodología de la investigación	29
3.2. Variación de la densidad en función de la temperatura de los tres PCMs.	33
3.3. Variación de la conductividad térmica en función de la temperatura de los tres PCMs.	33
3.4. Variación del calor específico en función de la temperatura de los tres PCMs.	34

3.5. Variación de la viscosidad dinámica en función de la temperatura de los tres PCMs.	34
3.6. Variación del punto de fusión en función de la concentración de los tres PCMs.	35
3.7. Geometría de simulación computacional.	36
3.8. Reporte generado para la obtención de datos.	41
3.9. Validación experimental del modelo numérico presentado, 13.38 % error.	45
3.10. Concepto recinto a temperatura controlada	46
3.11. Modelo de la caja de aislante y numeración de las paredes	47
3.12. Modelo de la cavidad de acrílico	48
3.13. Compresor Embraco EM3D60HLT	49
3.14. Unidad condensadora	50
3.15. Válvula aguja 148b4140	50
3.16. Evaporador para el sistema de refrigeración	51
3.17. Controlador de refrigeración electrónico ERC 213	52
3.18. Diagrama de conexión del controlador ERC 213	53
3.19. Corte de espuma rígida para fabricación de la caja	54
3.20. Corte de de acrílico con navaja	55
3.21. Cavidad de acrílico	56
3.22. Soporte del evaporador	57
3.23. Ángulos de aluminio para soporte de válvula	58

3.24. Tubería flexible de cobre de 1/4"	58
3.25. Instalación del sistema de refrigeración	59
3.26. Diagrama de bloque de la adquisición de datos del campo de tempe- raturas	60
3.27. Hardware de NI utilizado en la adquisición de datos	61
3.28. Termopar tipo "T"	62
3.29. Válvula de expansión en funcionamiento	63
3.30. Evaporador en funcionamiento	64
3.31. Termopares para monitoreo de temperatura	65
3.32. Monitoreo del banco de pruebas en LabView	65
3.33. Prueba de temperatura del termostato	66
3.34. Baño térmico de recirculación PP15R-40-AA1B	67
3.35. Calibración de termopares tipo T en baño de recirculación térmico . .	68
3.36. Calibración de termopares tipo T	70
3.37. Gráfica de 5°C a -25°C de los termopares calibrados	71
3.38. Cámara fotográfica y lente de aumento para cámara CANON.	72
3.39. Fotografía del frente de fusión a 180 minutos.	73
3.40. Imagen binarizada de la captura del frente de fusión	74
3.41. Distribución de los termopares para la obtención del campo de tem- peratura	75
3.42. Modelo para acoplamiento de Técnica PIV con banco experimental. .	76

3.43. Campo de velocidades para calibrar mediciones.	77
3.44. Acoplamiento técnica láser PIV con banco de pruebas experimental. .	79
4.1. Avance del frente de fusión de los PCMs indicado en minutos. EG (a), PG (b) y NaCl (c).	81
4.2. Comparación de la fracción líquida de los tres PCMs.	83
4.3. Contornos de temperatura de la cavidad con PCM, (a)-(c) agua con EG al 33 %, (d)-(e) agua con PG 36 % y (g)-(i) agua con NaCl al 21 %. 84	84
4.4. Comparación del Nu para los tres PCMs.	86
4.5. Vectores de velocidad y fracción líquida para el caso de agua con EG a los 30 minutos.	87
4.6. Magnitud de la velocidad global en función de la fracción del tiempo total de fusión.	88
4.7. Magnitud de la velocidad de la cavidad con PCM, (a)-(c) agua con EG al 33 %,(d)-(f) agua con PG 36 % y (g)-(i) agua con NaCl al 21 %. 90	90
4.8. Frente de fusión de agua con NaCl al 18.8%wt	91
4.9. Frente de fusión de agua con EG 30.5%wt	93
4.10. Frente de fusión experimental binarizado	95
4.11. Pared de la fuente de calor de la cavidad escarchada	96
4.12. Energía total absorbida en el proceso de fusión de la mezcla de agua con EG al 30.5wt %	98
4.13. Energía total absorbida en el proceso de fusión de la mezcla de agua con NaCl al 18.8wt %	99

4.14. Número de Nusselt promedio obtenido en la prueba experimental de transferencia de calor para el agua con EG a 30.5 % y agua con NaCl al 18.8%.	101
4.15. Prueba de resultado de campo de velocidades con agua	104
4.16. Campo de velocidades instantáneo de la solución agua con EG a 6 horas del proceso de fusión	105
4.17. Campo de velocidades instantáneo de la solución agua con NaCl a 3 horas del proceso de fusión	106
4.18. Campo de velocidades instantáneo de la solución agua con NaCl a 3 horas y 30 minutos del proceso de fusión	107
4.19. Campo de velocidades instantáneo de la solución agua con NaCl a 4 horas del proceso de fusión	108
4.20. Flujos impulsados por flotabilidad en una placa inclinada.	109
4.21. Contornos de temperatura y función de corriente para a) $\Lambda = 1/3$ y b) $\Lambda = 1/10$. Los demás parámetros son $Ra = 10^5$, $Pr = 7$	110

ÍNDICE DE TABLAS

2.1. Propiedades físicas de etilenglicol y propilenglicol	17
3.1. Propiedades termofísicas de la mezcla de agua con EG al 33wt %, con PG al 36wt % y con NaCl al 21wt %	31
3.2. Variación de las propiedades termofísicas en función de la temperatura de la mezcla agua con EG al 33 %	31
3.3. Variación de las propiedades termofísicas en función de la temperatura de la mezcla agua con PG al 36 %	32
3.4. Variación de las propiedades termofísicas en función de la temperatura de la mezcla agua con NaCl al 21 %	32
3.5. Números de Courant aceptables correspondientes a cada etapa de la solución numérica	42
3.6. Dependencia de malla en comparación con la malla de tamaño de elemento de 0.5mm	43
3.7. Propiedades termofísicas del Acido Láurico	44
3.8. Parámetros adicionales del termostato.	66
3.9. Parámetros y cacterísticas del láser Nano L 200-15 PIV	78

3.10. Parámetros considerados en el análisis PIV introducidos en el software DynamicStudio	78
4.1. Propiedades termofísicas y números característicos adimensionales de ambas soluciones	103

NOMENCLATURA

SIGLAS

CFD	Dinámica de Fluidos Computacional
DCS	Calorimetría de Escaneo Diferencial
EG	Etilenglicol
FAO	Organización Federal de Alimentos
LHS	Almacenamiento por Calor Latente
NaCl	Cloruro de Sodio
PCM	Material de Cambio de Fase
PIV	Velocimetría de Imagen por Partículas
PG	Propilenglicol
SHS	Almacenamiento por Calor Sensible
TES	Almacenamiento de Energía Térmica
wt %	Porcentaje en peso

LETRAS

α	Coefficiente de difusividad térmica	$[\frac{m^2}{s}]$
β	Coefficiente de expansión volumétrico	$[\frac{1}{K}]$
Γ	Relación de aspecto	$[-]$
λ	Fracción líquida	$[-]$
μ	Viscosidad dinámica	$[mPa \cdot s]$
ν	Viscosidad cinemática	$[\frac{m^2}{s}]$
ρ	Densidad	$[\frac{kg}{m^3}]$
a	Fracción	$[-]$
C	Calor específico	$[\frac{J}{kgK}]$
Co	Número de Courant-Frierichs-Levy (CFL)	$[-]$
Fo	Número de Fourier	$[-]$
Gr	Número de Grashof	$[-]$
g	Aceleración de la gravedad	$[\frac{m}{s^2}]$
H	Altura	$[m]$
h_{sf}	Entalpía específica de fusión	$[\frac{J}{kg}]$
k	Conductividad térmica	$[\frac{W}{mk}]$
m	Masa	$[kg]$
Pr	Número de Prandtl	$[-]$
Q	Calor	$[J]$
\dot{Q}	Transferencia de calor	$[W]$
Nu	Número de Nusselt	$[-]$
Ra	Número de Rayleigh	$[-]$
s	Frente de fusión	$[-]$
Ste	Número de Stefan	$[-]$
T	Temperatura	$[^{\circ}C]$
t	Tiempo	$[s]$
u	Velocidad en la dirección de x	$[\frac{m}{s}]$
v	Velocidad en la dirección de y	$[\frac{m}{s}]$

w Velocidad en la dirección de z $\left[\frac{m}{s}\right]$

SUBÍNDICES

c	Característica
i	Inicial
f	Final
m	Fusión
lp	Calor específico líquido
r	Reacción
s	Sólido
sp	Calor específico sólido
w	Pared (caliente)
∞	Ambiente

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, quiero agradecer a mi familia que siempre estuvieron para mí en cada altibajo que tuve en estos estudios de maestría. A mi esposa Vanesa, que aceptó casarse conmigo mientras estaba estudiando, que me apoyo incondicionalmente y tuvo paciencia en cada etapa de mis estudios, cuando tuve que dedicarle más tiempo a esta investigación que a ella durante estos dos años, cuando tuve que salir de viaje a presentar mi artículo y tantos cambios de emoción que pasé, sin alterar su amor hacia mí en ningún momento. A mis padres, Santos y Laurentina, que me inculcaron la creencia y confianza en Dios (que me ayudó a alentarme en muchos aspectos de mi vida), que me apoyaron en cada aspecto de mi trayectoria académica desde mi licenciatura, motivándome a que nunca dejaré de estudiar, que mientras fuera joven buscara desafiarme y aprender siempre cosas nuevas que me ayuden a mi desarrollo profesional, gracias por la vida que me han dado, no cambiaría ningún aspecto de ella.

Al Dr. Fausto, que a través las materias de Mecánica de Fluidos y Aerodinámica impartidas en la licenciatura, me demostró con su ejemplo que la ingeniería no es fácil pero una vez comprendiendo los principios fundamentales y estudiando igual de duro que lo que necesita estudiar un médico, es posible ser un Ingeniero de clase mundial a pesar de las restricciones, que es a lo que me ha inspirado a convertirme. También por una plática que tuvimos en donde me dijo que vale la pena invertir dos años de mi vida en un estudio de posgrado para una mejor preparación al mundo profesional, para lo cual puedo asegurar que tuvo razón y ahora estoy viendo ese fruto.

A la red de profesores del cuerpo académico del Grupo de Energías Térmica y Renovable (GETR) de este posgrado. Al Dr. Daniel por toda la asesoría dada en mi trabajo de tesis y trabajos adyacentes, por apoyarme en las pruebas experimentales, por facilitarme los recursos para la construcción del banco de pruebas y la inscripción al congreso de la SOMIM 2022. Al Dr. Hugo, por su amistad, por mentorearme a lo largo de mi estancia en el laboratorio de Ambiente Controlado, por su confianza para involucrarme en actividades del grupo y del laboratorio de certificación de la NOM-012-ENER-2019, el aprendizaje obtenido superó mis expectativas. A todos mis maestros de clase, Dr. Óscar, Dr. Héctor, Dr. Arturo, Dr. Santos, M.C. Yera, Dr. Cedillo, sus charlas y experiencias aportaron significativamente a mi aprendizaje y formación profesional. Al Dr. Simón, por ser parte esencial en la creación y mejora de esta maestría, estando al cuidado de sus alumnos. Por haber hecho posible el congreso de la SOMIM 2022 en Bogotá, Colombia, fungiendo como presidente de la SOMIM en aquel momento, esto permitió que fuera a presentar mi artículo allá y, definitivamente, fue una de las experiencias más enriquecedoras y placenteras de toda mi vida, gracias por su esfuerzo.

A mis compañeros y amigos de maestría. A Luis, por motivarme a no rendirme y aprender más, admiro tu conocimiento e intelecto. A Daniel, por recordarme que siempre es importante trabajar duro y rápido a pesar de lo que suceda. A Oziel, por motivarme a salir de mi zona de confort y siempre estudiar más. A Juan Medel, por ser siempre tan agradable y confiarme su más sincera amistad. A René y Marissa, su compañerismo fue tan placentero, enriquecieron mucho mi estancia en la maestría. A Irak, por su confianza e inspiración para no desistirse a ningún sueño que tengamos. A Brandon, por su amistad y apoyo dentro y fuera de la escuela, gracias por los buenos momentos. Y a Marian, por su apoyo en la estancia de investigación, que me ayudó cuando comencé con la construcción del banco de pruebas para mi investigación, gracias por todo el buen trabajo hecho.

A mis amigos Mauricio, Jesús y Daniel, por apoyarme y acompañarme en esta etapa de mi vida y por los grandiosos días que pasamos mientras estábamos en

AXIOS y en el trabajo. Gracias por mantener su sincera amistad hasta hoy.

A CONACyT, por la beca otorgada número **1101956** para que comenzara y culminara mis estudios de maestría.

A Dios, porque toda la sabiduría y la vida que tengo proviene de Él y fue mi refugio en muchos momentos de angustia. A Él sea la Gloria y el Imperio en Cristo Jesús por todas las edades. Rom. 1:16 - 2a Tim. 1:12

Este trabajo fue realizado en los Laboratorios de Investigación e Innovación en Tecnología Energética (LIITE) del Grupo de Energías Térmica y Renovable (GETR) de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (FIME) de la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL).

RESUMEN

Jonathan Isaí López García.

Candidato para obtener el grado de Maestría en Ciencias de la Ingeniería con Orientación en Energías Térmica y Renovable.

Universidad Autónoma de Nuevo León.

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.

Título del estudio: EFECTO DE LA VARIACIÓN DE LAS PROPIEDADES TERMOFÍSICAS EN PCMs SOBRE LA RAPIDEZ DE FUSIÓN DENTRO DE CAVIDADES CERRADAS BAJO CONDICIONES DE TEMPERATURA DE CONGELACIÓN USANDO PIV.

Número de páginas: 127.

OBJETIVOS Y MÉTODO DE ESTUDIO: El objetivo principal de esta investigación fue el análisis que tiene la importancia de las propiedades termofísicas de los PCMs y su impacto en el proceso de cambio de fase para la contribución del estudio del almacenamiento térmico de alimentos. Se utilizó un método teórico (análisis computacional) en donde se definieron ecuaciones de gobierno, condiciones de frontera y análisis de los resultados. Y se utilizó un método experimental (banco de pruebas) en donde se contruyó un banco de pruebas, se midió la fracción líquida de dos PCMs, adquiriendo sus campos de temperatura correspondientes en el procesod de fusión y con la ayuda de la técnica láser PIV, se obtuvieron el campo de velocidades.

CONTRIBUCIONES Y CONCLUSIONES: Se realizó y presentó un artículo relacionado a esta investigación en el congreso de la SOMIM 2022 en Bogotá, Colombia. Esta investigación contribuye también al campo de los Materiales de Cambio de Fase en condiciones de temperatura de congelación y su análisis térmico y fluidodinámico. Se concluye que la viscosidad y conductividad térmica son las principales propiedades que rigen el comportamiento termofluidodinámico del cambio de fase, debido a que son función de los números de Prandtl y Rayleigh, que rigen la relación de difusión viscosa y difusión térmica, y la relación entre las fuerzas de flotación y difusividades térmica y viscosa, respectivamente.

Firma del asesor: _____

Dr. Daniel de la Rosa Urbalejo

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 MOTIVACIÓN

Los procesos de conservación de alimentos facilita el consumo de los mismos, sin importar la distancia en la que es cosechado o procesado. Una de las partes de dicho proceso es el transporte de los alimentos, el cual contribuye directamente al éxito o al fracaso del productor agrario, dado que dichos alimentos son utilizados para fabricar otros productos o son llevados al consumidor final. Este transporte es una de las actividades más complejas, dado que existe una diversidad de alimentos que necesitan ser conservados a diferentes temperaturas o condiciones especiales para que puedan ser utilizados en el proceso de compra-venta de los mismos.

El uso de una correcta operación en la transportación de los alimentos repercute directamente en la calidad y limpieza de los mismos, dado que puede ocurrir un deterioro de ellos si no se mantienen en condiciones favorables. Un informe del Boletín de Pérdidas y Desperdicios de Alimentos de la FAO (Organización Federal de Alimentos) muestra que México pierde el 37% de sus alimentos en el proceso de cosecha y transportación, lo que representa 10 millones 431 toneladas por año [1]. Dicho monto bastaría para satisfacer el hambre de 7.4 millones de mexicanos en pobreza extrema y posible inseguridad alimenticia.

También existe desperdicio a nivel industrial, el cual se dice que representa un pérdida aproximada de 120 mil millones de pesos al año. El Índice de Desperdicio de Alimentos en México muestran que productos como la guayaba, leche y mango, entre algunos otros, tienen pérdidas del 50%, considerando desde la cosecha hasta el consumidor en el hogar o restaurante, debido a la falta de medios de distribución o conservación desde el campo y, por ende, la falta de camiones con congeladores [1].

Este tipo de problemas existentes en la actualidad son denominadas como deficiencias en el transporte de alimentos, el cual afecta mayormente a las zonas rurales alejadas, impactando así a los pequeños y medianos productores. Es por ello que una de las soluciones que contribuyen a la conservación o transportación de

alimentos es el estudio del almacenamiento de energía por medio de Materiales de Cambio de Fase (PCM, por sus siglas en inglés).

Estos materiales sirven para absorber y ceder energía aprovechando una propiedad llamada Calor Latente de Fusión, la cual permite que, según el caso de aplicación, conservar o mantener por un largo periodo de tiempo una sustancia a la temperatura de cambio de fase del PCM. Para aplicaciones de refrigeración, este material es muy útil ya que si se utiliza en un ciclo de refrigeración convencional, se congelará el PCM para que después de apagado el ciclo del compresor, mientras este material se calienta, puede conservar un mayor tiempo la temperatura de la sustancia que está siendo refrigerada aún cuando el sistema se encuentre apagado, gracias al comportamiento casi estable del cambio de estado del PCM.

Hasta la fecha, las investigaciones realizadas han sido en materiales con temperaturas de cambio de fase medias (alrededor de 25°C) o altas (alrededor de 50°C), en donde los PCMs utilizados tienen una temperatura de cambio de fase superior a los 20°C . Es por eso que esta investigación es pertinente, ya que existe información muy escasa en estudios de PCMs a temperaturas bajo cero, y debido a que existe una necesidad de investigar el comportamiento térmico en este rango de temperaturas (debido a que puede ser utilizado como un medio de conservación de alimentos mediante la congelación), toma mucha relevancia el estudio del frente de fusión con materiales a bajos puntos de cambio de fase, caracterizando el fenómeno de fusión con la variación de las propiedades termofísicas, cuya variación depende de la sustancia y de la temperatura. Dichas propiedades a analizar son la densidad, el calor específico, la conductividad térmica y la viscosidad, en donde la variación de la densidad en función de la temperatura toma un peso importante, ya que gobierna el transporte de calor por convección natural, lo que se espera que cobre importancia en el proceso de cambio de fase. Esto conducirá a un diferente frente de fusión para cada caso.

Con la ayuda de la técnica óptica láser de Velocimetría de Imagen por Partícula-

las (PIV, por sus siglas en inglés), dicha investigación tomará mayor relevancia, ya que no sólo observaremos el frente de fusión sino el comportamiento termofluidodinámico durante el proceso de fusión para diferentes PCM, lo que nos permitirá observar y analizar los patrones de flujo de la convección natural a lo largo del cambio de fase, y así, las conclusiones obtenidas tengan una mayor solidez con la obtención del campo de velocidades en el proceso de fusión.

1.2 ANTECEDENTES

Para la elección de los PCMs utilizados en éste estudio, se determinó realizar una investigación de la literatura y revisiones sobre recopilaciones y usos de los PCMs [9, 13, 67, 76]. Estos documentos muestran información sobre los diferentes análisis que se realizan en los PCMs, resaltan características del material, como la estabilidad térmica, resistencia a la corrosión, aplicaciones para diferentes rangos de temperatura, entre otros. También, muestran diferentes experimentos que se han realizado para diferentes aplicaciones, como sistemas de refrigeración, aire acondicionado, conservación de alimentos y materiales especiales, almacenamiento térmico en frío, éste último tiene relevancia con el tema de esta investigación.

Estudios han demostrado la eficacia que tiene el almacenamiento de energía a través del uso de PCMs. En un estudio realizado por Leducq et. al. (2014) [37] se comparó el desempeño térmico de dos materiales utilizados como aislantes/almacenadores térmicos para un recipiente con helado comestible, dichos materiales fueron un PCM (agua con cloruro de sodio) y poliestireno. El impacto de las fluctuaciones de temperatura y el tamaño de distribución de los cristales de hielo en el envase de helado fueron caracterizados. Como resultado, con una temperatura inicial de -22°C , el empaque con PCM mantuvo solamente incrementos de 1°C al ser expuesto al ambiente por 40 min, con sólo 4mm de espesor; mientras que en el caso del empaque con poliestireno, el helado tuvo un aumento de 10°C bajo las mismas condiciones.

Las bases para el análisis numérico del proceso de cambio de fase en PCMs ha sido desarrollado por diversos autores. El principal de ellos es el desarrollado por Voller et. al. (1987) [70] que presentaron un modelo numérico basado en la formulación de entalpías que caracteriza la forma en que avanza el calor latente y el flujo en la zona de transición sólido-líquido. Utilizando las ecuaciones descritas por Patankar [54], se desarrollaron los términos fuente, usando una fuente de Darcy para modelar el efecto de la porosidad de la región de transición del campo de fluido y una fuente de calor latente en función de la fracción sólida y la temperatura. Se demostró la aplicación del método con un evento de congelamiento en una cavidad bajo convección natural.

En el estudio realizado por Zhang y Bejan (1988) [82], analizaron la dependencia temporal de un sólido subenfriado en un líquido sobrecalentado, encontrando relevancia en la capa límite en función del tiempo, como otra parte de su investigación, realizaron experimentos de fusión en una cavidad cuadrada mientras es calentada constantemente en un costado. Los resultados muestran que el número de Nusselt aumenta cuando aumenta la relación entre la conductividad del sólido y el fluido.

El uso de estos modelos han sido adaptados en función de la orientación de la investigación. Por ejemplo, Zivkovic y Fujii (2001)[73] presentaron un modelo computacional para el cambio de fase isotérmico. Para el modelo matemático se utilizó la formulación de entalpías. Los resultados muestran que el recipiente rectangular tarda menos tiempo en fundirse que el cilíndrico, bajo la consideración que ambas geometrías tenían el mismo volumen y área de transferencia de calor.

Investigaciones más recientes también han sido realizadas, en donde se llevaron a cabo simulaciones con soluciones eutécticas inorgánicas, como la de Li et. al. (2016) [40], en donde buscan obtener las propiedades en algunas soluciones salinas con

el método de Calorimetría de Escaneo Diferencial (DSC, por sus siglas en inglés) para simular tres sustancias, analizando la transferencia de calor comparándolas entre sí. También Lin et. al. (2018) [42], desarrollaron un método para mejorar la conductividad térmica de los PCMs, en donde utilizan aditivos de alta conductividad térmica, como carbono, grafeno, nanotubos de carbono y espumas metálicas, con el fin de incrementar hasta 60 veces la conductividad térmica de la solución.

Técnicas ópticas avanzadas han sido desarrolladas para estudiar el comportamiento fluido-dinámico del cambio de fase bajo convección natural, como el estudio realizado por Jevnikar et. al. (2019) [29], donde se reporta la caracterización del comportamiento térmico y flujo transitorio de un PCM durante su cambio de fase, utilizando la técnica óptica láser PIV, que es utilizada para medir el campo de velocidades en el proceso de fusión del PCM. Los experimentos fueron realizados mediante una fuente de calor a 0°C, 8°C y 18°C. Polyfin fue usado como PCM. Se utilizaron esferas de vidrio huecas recubiertas de plata con un diámetro de 13 μm como partículas trazadoras y otros parámetros del equipo utilizado, como la frecuencia de adquisición y la ventana de interrogación.

Otro de los estudios es el de Liu et. al. (2022) [43] en donde analizan el desempeño transitorio de n-octadecano como PCM dentro de una cavidad con un relleno de espuma metálica para mejorar la respuesta térmica del cambio de fase. El campo de velocidad fue medido con la técnica láser PIV. El efecto del almacenamiento de energía con esta espuma es despreciable dado la pequeña cantidad de masa que tiene en comparación con la masa del PCM. Se encontró que el caso con menos espuma metálica, promovió una rapidez de fusión más acelerada que los otros casos, la cual debe ser considerada debido al mejor desempeño térmico que tuvo dando lugar a una rapidez de fusión mayor.

1.2.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Actualmente el estudio de los PCMs ha resultado de mucho interés durante los últimos 40 años, tanto numérica como experimentalmente, debido a la diversidad de soluciones que ofrecen sus usos de aplicación práctica, como es: inercia térmica, protección térmica, almacenamiento de energía, suministro de energía, ahorro de energía, entre otros usos técnicos [61]. Estos estudios han dado un gran avance para el uso de los PCMs en distintas aplicaciones finales, como la refrigeración, la generación de energía solar, en plantas de uso de calor residual, en edificaciones, entre otros. Sin embargo, estos estudios están muy enfocados en materiales con puntos de fusión medio-alto superiores a los 20°C [29, 65, 73, 81], utilizando distintas parafinas como PCM, dejando una brecha muy grande en la experimentación y comportamiento de otros tipos de materiales eutécticos y con puntos de fusión debajo de los 0°C , para fines de conservación de alimentos congelados.

En esta investigación se propone analizar diferentes PCMs con puntos de fusión bajo cero, realizar un modelo numérico mediante Dinámica de Fluidos Computacional (CFD por sus siglas en inglés) para analizar el efecto de las propiedades termofísicas sobre el frente de fusión y la transferencia de calor de dichos PCMs y, posteriormente, validar mediante experimentación y la técnica óptica láser PIV los resultados obtenidos de la simulación como fracción líquida, frente de fusión, calor absorbido, número de Nusselt y campo de velocidades.

1.3 HIPÓTESIS

El estudio del proceso de fusión de los PCMs es importante para estudiar la dinámica de fluidos del proceso, el comportamiento térmico y la importancia de las propiedades termofísicas. Si se realiza un análisis del proceso del cambio de fase de

diferentes sustancias con un punto de fusión fijo, podremos obtener un comportamiento térmico y fluido diferente. Si se analiza la fusión de algunos materiales con diferentes propiedades termofísicas, la densidad y el calor específico no tendrán mucha relevancia en el frente de fusión, pero la conductividad térmica y la viscosidad sí, ya que éstas se encuentran en funciones que rigen la transferencia de calor y convección natural, respectivamente.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 OBJETIVO GENERAL

Analizar el efecto en la transferencia de calor que tiene el cambio de las propiedades termofísicas con PCMs en condiciones de temperatura de congelación, validando uno de los casos mediante experimentación.

1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desarrollar un modelo numérico en software ANSYS Fluent que simule el efecto de fusión de los PCMs a analizar.
- Construir un banco de pruebas para la validación del modelo numérico.
- Realizar las pruebas experimentales en donde se acople la técnica óptica láser PIV.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1 ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA

El almacenamiento de energía se ha convertido en una parte importante de los sistemas tecnológicos de energías renovables. Los sistemas de Almacenamiento de Energía Térmica (TES, por sus siglas en inglés), son una tecnología que almacena energía térmica por calentamiento o enfriamiento de un medio almacenado tal que puede volver a ser utilizado después para absorber y liberar energía. Los TES son sistemas usados particularmente en edificaciones y en procesos industriales. Una de las principales ventajas de usar TES en un sistema energético es que pueden incrementar su eficiencia global y mejorar el desempeño en la eficiencia térmica[61].

Los TES funcionan almacenando energía por medio del calor sensible del material, del calor latente, por un proceso termoquímico o una combinación de estos [55]. El Almacenamiento por Calor Sensible (SHS, por sus siglas en inglés) opera mediante el aumento de la temperatura de un sólido o un líquido, utilizando la capacidad calorífica y el cambio de temperatura del material durante el proceso de carga o descarga de energía. La cantidad de calor almacenado depende del calor específico de la sustancia, el cambio de temperatura y la cantidad del material que almacena energía. La ecuación que calcula el calor sensible se presenta a continuación [63]:

$$Q = \int_{T_i}^{T_f} mC_p dT = mC_p (T_f - T_i) \quad (2.1)$$

donde m es la masa, C_p es el calor específico, T_f es la temperatura final y T_i la temperatura inicial.

El Almacenamiento por Calor Latente (LHS, por sus siglas en inglés) funciona por absorción o liberación de calor cuando el material que almacena energía pasa por un cambio de fase de sólido a líquido, o líquido a gas, o viceversa. La capacidad de almacenaje de un sistema LHS de un material de cambio de fase está dada por las siguientes ecuaciones [63]:

$$Q = \int_{T_i}^{T_m} mC_p dT + ml_f \Delta h_{sf} + \int_{T_m}^{T_f} mC_p dT \quad (2.2)$$

$$Q = m [C_{sp} (T_m - T_i) + l_f \Delta h_{sf} + C_{lp} (T_f - T_m)] \quad (2.3)$$

donde T_m es la temperatura de fusión, l_f la fracción líquida, h_{sf} el calor latente de fusión, C_{sp} el calor específico en estado sólido y C_{lp} el calor específico en estado líquido.

En sistemas termoquímicos, la energía absorbida y liberada depende de la ruptura o adhesión de la unión de las moléculas en una reacción completamente química. En este caso, el calor almacenado depende de la cantidad del material, el calor de reacción endotérmica y el avance de la reacción.

$$Q = a_r m \Delta h_r \quad (2.4)$$

donde a_r es la fracción de reacción química, y h_r es el calor de reacción endotérmico.

2.2 MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

Entre las técnicas de almacenamiento térmico de calor mencionadas, el almacenamiento térmico de calor latente, es particularmente atractivo debido a su habilidad de almacenar o ceder una gran cantidad de energía a una temperatura casi constante, la cual corresponde a la temperatura de transición de fase del PCM. El cambio de fase puede ser de la siguiente forma: sólido-sólido, sólido-líquido, sólido-gas, líquido-gas y viceversa.

A diferencia del almacenamiento térmico convencional (sensible), un PCM absorbe y libera calor casi a una temperatura constante. Estos almacenan calor de 5 a 14 veces más por unidad de volumen que los materiales de almacenamiento por energía sensible [63].

En transiciones sólido a sólido, el calor es almacenado conforme el material es transformado de una estructura cristalina a otra. Estas transiciones generalmente tienen un bajo calor latente y cambios de volumen más pequeños que las transiciones de sólido a líquido. Los PCMs de sólido a sólido ofrecen ventajas en la selección del contenedor y una mayor flexibilidad en el diseño del contenedor.

Transiciones de sólido a gas y líquido a gas tienen un alto calor latente, sin embargo sus grandes cambios de volumen en la transición implican problemas de confinamiento provocando descartar su potencial en sistemas de almacenamiento térmico de fácil manufactura. El sistema se vuelve muy complejo e impráctico debido a estos grandes cambios de volumen [63].

El cambio de fase de sólido a líquido tiene un calor latente más bajo comparado con la transición de líquido a gas. Sin embargo, el cambio de volumen es mucho

menor (del orden de 10 % o menos), lo que lo hace económicamente atractivo para su uso en sistemas de almacenamiento de energía térmica. Los PCMs por sí mismos no pueden ser usados como el transporte de la transferencia de calor. Es necesario un medio que favorezca la transferencia de calor entre la fuente y el PCM, o entre el PCM y la carga térmica. Este medio que favorece la transferencia de calor debe ser diseñado especialmente, ya que los PCMs no suelen tener una alta difusividad térmica.

Debido al cambio de volumen del PCM en la fusión, el contenedor necesitará un diseño especial que almacene el material. El contenedor debe ser capaz de absorber estos cambio de volumen y también ser compatible con el PCM a utilizar. Por lo tanto, cualquier sistema de LHS debe cumplir con los siguientes requisitos:

- Un PCM con punto de fusión en el rango de temperatura deseable.
- Una superficie adecuada que intercambie calor
- Un contenedor que sea compatible con el PCM

El desarrollo de estos sistemas, por lo tanto, requiere entender tres temas esenciales: materiales de cambios de fase, materiales contenedores y medios de transferencia de calor [63].

2.2.1 CLASIFICACIÓN DE LOS PCMs

Existe una gran cantidad de PCMs para diversos rangos de temperatura. La Fig. 2.1 muestra las familias que clasifican a los PCMs, las cuales están compuestas de materiales orgánicos, inorgánicos y eutécticos. Los materiales orgánicos son, a su vez, clasificados en parafinas y no parafinas. Los materiales inorgánicos son clasificados como salmueras y materiales metálicos. Los materiales eutécticos son mezclas de dos o más sustancias las cuales se solidifican simultáneamente alcanzado un punto

de congelación menor que una de las dos sustancias [51].

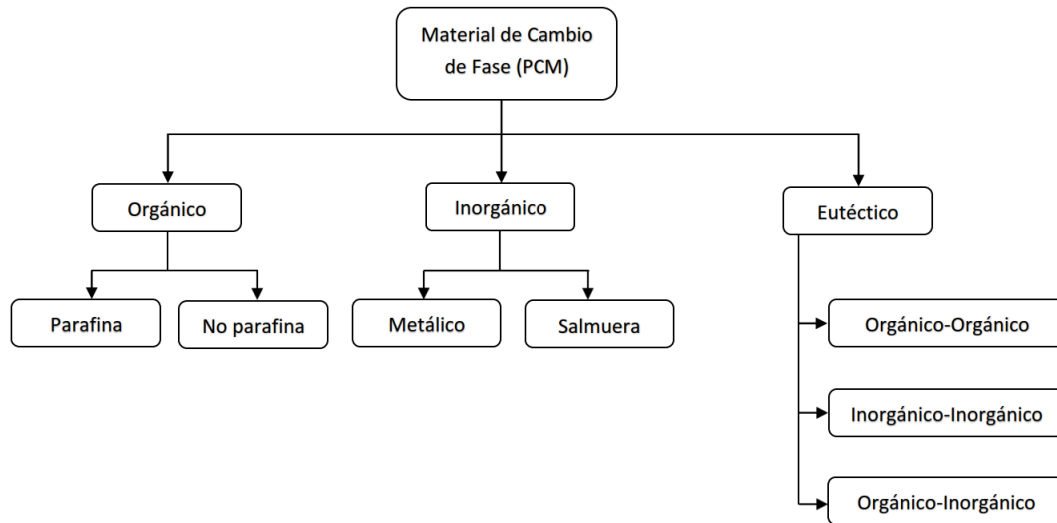


Figura 2.1: Clasificación de los PCMs

Existe una gran cantidad de PCMs que satisfacen el amplio rango de calor de fusión existente, donde también se conocen sus puntos de fusión, sin embargo, para su uso como materiales de almacenamiento por calor latente, deben también presentar ciertas propiedades termodinámicas, cinemáticas y químicas deseables. El PCM a ser utilizado en el diseño de un sistema de almacenamiento térmico debe cumplir con estas propiedades mencionadas, como se presentan en las siguientes secciones.

2.2.1.1 PROPIEDADES TÉRMICAS

La selección de un PCM para una aplicación particular debe cumplir con la temperatura de operación de dicha aplicación la cual tiene que ser equivalente con la temperatura de transición del PCM. El calor latente debe de ser tan alto como sea posible, para minimizar el tamaño del material. Una alta conductividad térmica debería ayudar a la carga de descarga del almacenador de energía, lo que brinda una buena transferencia de calor al momento de operar.

2.2.2 PROPIEDADES FÍSICAS

La estabilidad en el cambio de fase durante la congelación o fusión es favorable para el material que almacena calor, también una alta densidad es deseable ya que permite que el contenedor tenga un menor tamaño. Pequeños cambios en el volumen durante el cambio de fase y una baja presión de vapor en temperaturas de operación reduce la cantidad de problemas.

2.2.3 PROPIEDADES CINEMÁTICAS

El superenfriamiento ha sido una problemática en el desempeño del PCM, particularmente en sales hidratadas. El superenfriamiento de algunos grados interfiere con una correcta extracción de calor del almacenador, por lo que puede generar problemas al momento de solidificar un PCM, y con tan sólo una variación de 5°C a 10°C de superenfriamiento puede afectar en el proceso completamente. Es por eso la recomendación de evitar escoger materiales que tengan una baja rapidez de cristalización.

2.2.4 PROPIEDADES QUÍMICAS

En la parte química de los PCMs, un problema puede ocurrir al degradarse por pérdida de agua, por descomposición química o por incompatibilidad con materiales de construcción. Los PCMs no deben ser tóxicos, inflamables y mucho menos explosivos por seguridad.

2.2.5 REFRIGERANTES SECUNDARIOS

Un refrigerante es cualquier cuerpo o sustancia que actúa como un agente enfriador gracias a la absorción de calor de otro cuerpo o sustancia el cual tiene que ser enfriado. Los refrigerantes primarios son aquellos que son utilizados en sistemas de refrigeración, donde estos son alternadamente vaporizados y condensados mientras absorben o ceden calor respectivamente. Los refrigerantes secundarios son fluidos que transfieren o almacenan de calor. Estos son en su mayoría líquidos utilizados para transportar energía de una fuente remota de calor al evaporador del sistema de refrigeración [20].

Los PCMs de tipo alcoholes, como el Etilenglicol (EG) y Propilenglicol (PG) son soluciones que generalmente se utilizan en sistemas TES en frío para la conservación de alimentos a baja temperatura. Cuando este tipo de materiales son diluidos en agua ocurre una reacción exotérmica con alcoholes, y una reacción endotérmica con soluciones salinas como el Cloruro de Sodio (NaCl).

2.2.5.1 GLICOLES

Etilenglicol y propilenglicol, cuando son propiamente inhibidos para el control de la corrosión, son utilizados como depresores acuosos del punto de congelación (anticongelante) y medio de transferencia de calor. Sus principales atributos son su capacidad para bajar eficientemente el punto de congelación del agua, su baja volatilidad y su relativamente baja corrosión. Soluciones de etilenglicol inhibidos tienen mejores propiedades termofísicas que las soluciones de propilenglicol, especialmente a bajas temperaturas.

El etilenglicol es una sustancia sin color y sin olor, completamente mezclable con agua. Entre sus ventajas están la baja volatilidad y la relativamente baja corrosividad cuando es propiamente inhibida. Las principales desventajas son que tiene

un bajo coeficiente de transferencia de calor a bajas temperaturas debido a su alta viscosidad (incluso más altas que el propilenglicol). No es apropiado para la industria alimenticia y no debería estar en contenedores abiertos. Preferiblemente se debe mezclar con agua que está clasificada como suave y con bajos porcentajes de iones de sulfato y cloruros, para que la preparación de la solución de etilenglicol sea la adecuada [4].

El etilenglicol puro se congela a -12.7°C . La composición y temperatura exactas para el punto eutéctico nos son tan confiables, dado que la solución en esa región se vuelve muy viscosa, generando masas de hielo que hacen difícil determinar el verdadero punto de congelación. En la parte diluida de la mezcla eutéctica, el hielo se forma durante la congelación, mientras que en la parte concentrada el glicol sólido se separa de la solución.

El propilenglicol es muy similar al etilenglicol, pero este no es tóxico y es usado en contacto directo con la comida. Es más costoso, tiene una viscosidad más alta y tiene bajos coeficientes de transferencia de calor [20]. Las propiedades de las sustancias puras se encuentran listadas en la Tabla 2.1.

Las densidades reportadas consideran que la solución acuosa cuenta con inhibidores para glicol, y son algo más altas que las sustancias puras. Las propiedades termofísicas para ambos fluidos son similares excepto por la viscosidad, y esto se puede ver que en la misma concentración para ambas soluciones, el propilenglicol tiene más viscosidad que la solución con etilenglicol. Este factor afecta significativamente en el desempeño entre los dos fluidos [4].

Conforme el fluido se congela, forma aguahielo que fluye hacia cualquier espacio disponible. Es importante destacar que el etilenglicol y el propilenglicol, cuando no se mezclan con agua, son menos corrosivos que el agua pura con materiales metálicos comunes. Sin embargo, una vez mezclado con agua (lo que es usual), todas las soluciones acuosas con glicol son más corrosivas que el agua pura, por lo que es necesario agregar inhibidores de corrosión y aditivos para neutralizar productos de

Propiedad	Etilenglicol	Propilenglicol	Unidad
Masa molecular relativa	62.07	76.10	–
Densidad a 20°C	1 113	1 036	kg/m ³
Punto de ebullición a 1 atm	198	187	°C
Presión de vapor a 20°C	6.7	9.3	Pa
Punto de congelación	-12.7	Comienza a cristalizarse debajo de -51°C	°C
Viscosidad a 0°C	57.4	243	mPa·s
Índice de refracción n_D a 20°C	1.4319	1.4329	–
Calor específico a 20°C	2 347	2 481	J/(kg·K)
Calor latente de fusión a -12.7°C	187	–	kJ/kg
Calor de vaporización a 1 atm	846	688	kJ/kg
Calor de combustión a 20°C	19.246	23.969	MJ/kg

Tabla 2.1: Propiedades físicas de etilenglicol y propilenglicol [4].

glicoles acídicos.

2.2.5.2 SALMUERAS

Las soluciones acuosas de cloruro de calcio y cloruro de sodio han sido históricamente las salmueras más utilizadas en la refrigeración. La Figura 2.2 muestra los valores del calor específico, la densidad, la viscosidad dinámica y la conductividad térmica de la mezcla de agua con cloruro de sodio. Todas estas gráficas muestran variaciones de las propiedades en función de la concentración en peso y de la temperatura [4].

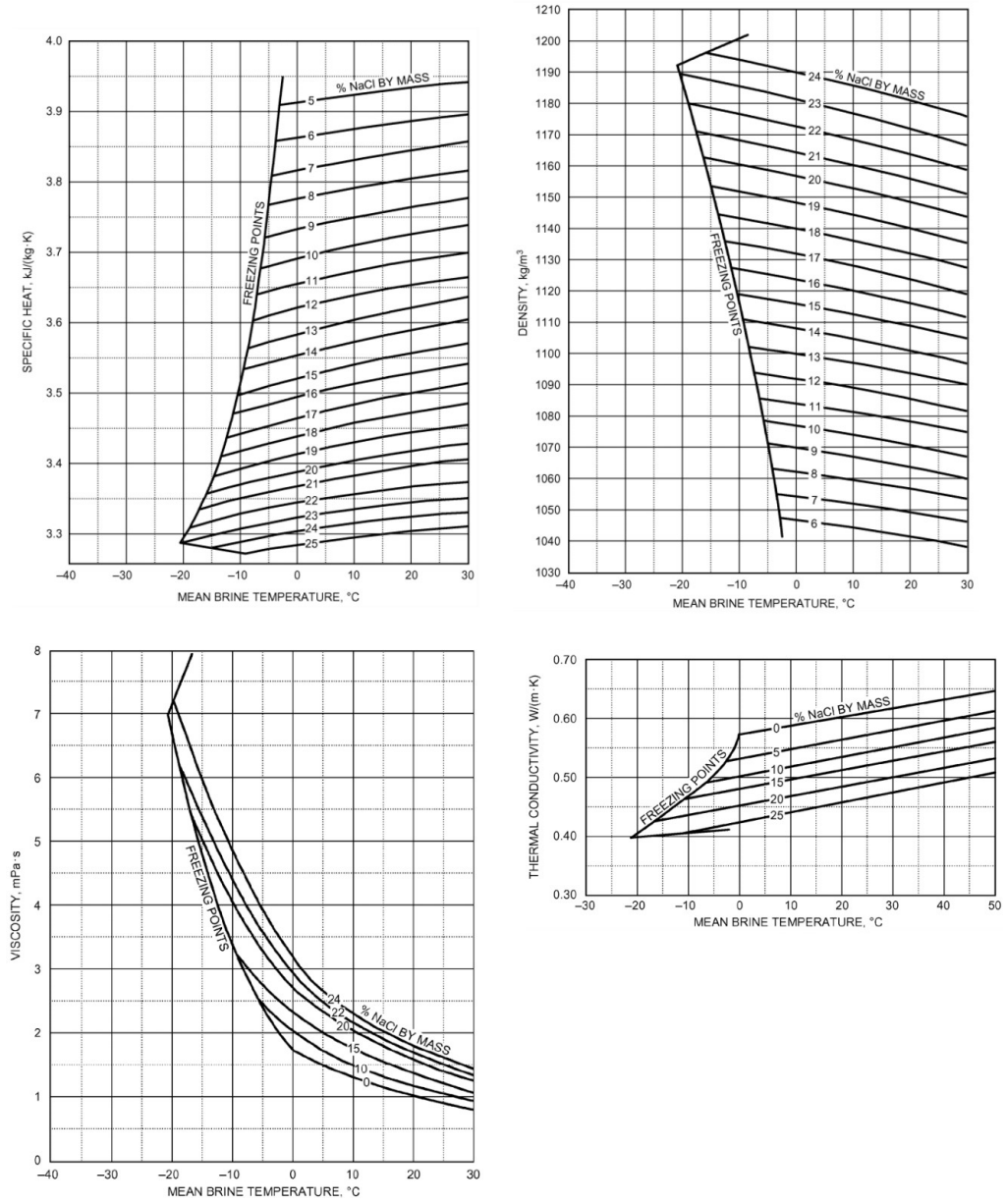


Figura 2.2: Propiedades termofísicas de salmuera de NaCl [4].

El agua sólo puede disolver cloruro de sodio hasta una concentración de 26.4wt % a 15°C, si la temperatura aumenta, esta concentración puede aumentar ligeramente. El diagrama de fase de la salmuera de NaCl es presentado en la Figura 2.3.

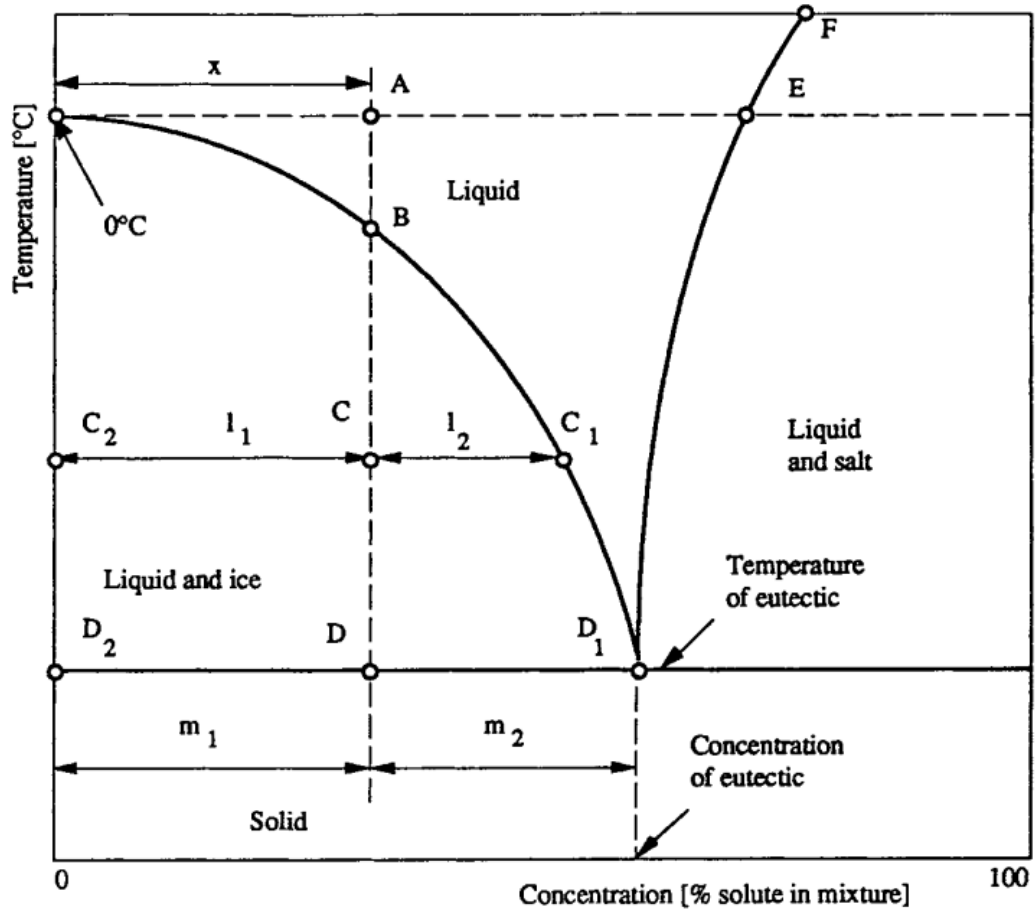


Figura 2.3: Diagrama de fase de la salmuera de NaCl a 100kPa [45].

La salmuera con concentración x no se solidifica a 0°C (temperatura de congelamiento del agua, punto A). Cuando la temperatura desciende al punto B, el primer cristal de hielo es formado. Conforme la temperatura sigue descendiendo a C, los cristales de hielo siguen formándose y se mezclan con la solución de salmuera formando aguanieve o nieve tipo granizado. En el punto C hay hielo en la mezcla $l_2/(l_1 + l_2)$, y líquido (salmuera) $l_1/(l_1 + l_2)$. En el punto D hay una mezcla de solución salina eutéctica m_1 (concentración $m_1/(m_1 + m_2)$) y otra parte de hielo m_2 (concentración $m_2/(m_1 + m_2)$). Enfriando la mezcla debajo del punto D se solidifica la solución completa en la temperatura eutéctica. La temperatura eutéctica es el punto más bajo que puede alcanzar la solución sin solidificarse.

Una virtud de la salmuera de NaCl es que dada su baja toxicidad, puede ser

utilizada en contacto con comida y en sistemas abiertos. Sin embargo, una de sus más grandes desventajas es que tiene un punto de congelación relativamente muy bajo y es altamente corrosivo, lo que implica usar inhibidores que deben ser muy bien analizados. La presencia de sales de magnesio en el cloruro de sodio no es muy deseable debido a que genera aguanieve de este tipo de sales en la solución. Para contrarrestar el PH alto (arriba de 7) es común utilizar sosa cáustica, la cual debe ser mezclada con agua tibia antes de mezclar con la solución salina.

2.2.6 APLICACIONES A BAJAS TEMPERATURAS

Una de las aplicaciones más importantes de los PCMs es su uso a bajas temperaturas, debido a que proveen protección contra calor debido a su inercia térmica cuando está cambiando de fase. Esta protección puede ser utilizada tanto para mantener sustancias calientes o frías. Algunos ejemplos son comida congelada, bebidas, productos farmacéuticos, derivados de sangre, circuitos electrónicos, comida cocinada, productos biomédicos y algunos otros productos.

En la literatura se reportan algunas aplicaciones comerciales en almacenamiento a baja temperatura [51], entre las que se destacan: contenedores para alimentos, bebidas, productos de *catering* y aplicaciones médicas.

2.2.6.1 CONTENEDORES PARA ALIMENTOS

Una de las aplicaciones más conocidas de los PCMs es el transporte de alimentos sensibles a la temperatura en contenedores. Estos contenedores deben ser puestos en un congelador con el fin de que el PCM sea solidificado. Existen ejemplos con este tipo de dispositivos contenedores comerciales [51], cuyos puntos de fusión son de 0°C , -15°C y -20°C . Otro ejemplo es el desarrollo realizado por Melone et. al. [47], donde un PCM compuesto fue diseñado con diferente calor latente en un rango

de temperatura de 4-10°C para empaque de almacenamiento a baja temperatura.

2.2.6.2 BEBIDAS

Una de las aplicaciones que ha sido mayormente comercializada son las botellas térmicas, coloquialmente llamados termo. Las cuales son botellas con doble pared con un PCM en la parte interna o en su defecto un aislante. Este concepto puede ser utilizado con muchos otros productos para mantener condiciones isotérmicas de bebidas frías, las cuales pueden ser vinos, refrescos o champagne.

2.2.6.3 PRODUCTOS DE “CATERING”

En muchas aplicaciones, comidas cocinadas o productos congelados son producidos en una condición de temperatura muy específica y tienen que ser transportados a largas distancias. Es aquí donde contenedores con PCM entran en juego para evitar romper la cadena de suministro en frío durante la transportación de comidas precocinadas, salmón ahumado, derivados de la leche, helados y otros productos.

2.2.6.4 APLICACIONES MÉDICAS

En el sector médico, una de las principales aplicaciones es la transportación de sangre y órganos. Su funcionamiento es similar a los contenedores para alimentos, pues la función es utilizar un PCM con un rango de temperatura que opere a las condiciones de almacenamiento que requieren estos tejidos y fluidos para mantenerlos en condiciones isotérmicas.

2.2.7 FRENTE FUSIÓN BAJO CONVECCIÓN NATURAL

El proceso de cambio de fase de fusión en presencia de convección natural es un fenómeno importante en el campo de ciencia de los materiales, TES en PCMs, el uso del calor residual por calor latente, deshielo, entre otros. Existe una fuerte relación entre el flujo de la fase líquida y la tasa de fusión de la fase sólida. Debido a esta conexión se comienza a determinar la forma instantánea de la interfase bifásica, lo cual constituye en una de las incógnitas en cada caso.

2.2.7.1 TRANSICIÓN DE RÉGIMEN DE CONDUCCIÓN AL RÉGIMEN DE CONVECCIÓN

La clave para la correcta correlación del complicado comportamiento de la convección natural en la fusión es el identificar las escalas correctas del fenómeno. Considerando una configuración en dos dimensiones como se muestra en la Fig. 2.4, donde el PCM está en su punto de fusión ($T_s = T_m$). Comenzando desde $t=0$, la pared lateral izquierda de la cavidad está siendo calentada y su temperatura permanece en un nivel constante. Este calentamiento induce la fusión en la interfase sólida-líquida, y la convección natural en la región comienza a aparecer.

El proceso de fusión por convección natural puede ser analizado como una secuencia de cuatro regímenes, los cuales están marcados (a)-(d) en la Figura 2.4. El primer régimen es el límite de conducción, cuando el flujo de calor que atraviesa la película líquida vertical emergente es balanceada completamente por la entalpía absorbida en la interfase sólida-líquida.

$$k \frac{T_m - T_s}{s} \approx \rho h_{sf} \frac{ds}{dt} \quad (2.5)$$

donde k es la conductividad térmica, T_s es la temperatura en estado sólido, s es el espesor del frente de fusión y ρ la densidad.

En términos adimensionales, esto concierne a:

$$\frac{s}{H} \approx \theta^{1/2} \quad (2.6)$$

donde θ es el grupo adimensional del tiempo y H la altura de la cavidad:

$$\theta = \frac{k(T_w - T_s)}{\rho h_{sf} H^2} t = Ste Fo \quad (2.7)$$

donde Ste y Fo son los números de Stefan y Fourier, k es la conductividad térmica y t el tiempo. Los números de Stefan y Fourier se desarrollan de la siguiente manera:

$$Ste = \frac{C_p(T_w - T_s)}{h_{sf}}, Fo = \frac{\alpha t}{H^2} \quad (2.8)$$

donde α es la difusividad térmica. El número de Nusselt que corresponde a este límite de conducción es:

$$Nu = \frac{\dot{Q}}{k(T_w - T_s)} \approx \frac{H}{s} \approx \theta^{-1/2} \quad (2.9)$$

donde \dot{Q} es la tasa de transferencia de calor total a través de la pared lateral izquierda de la cavidad, por unidad de longitud en la dirección perpendicular al plano de la Fig. 2.4.

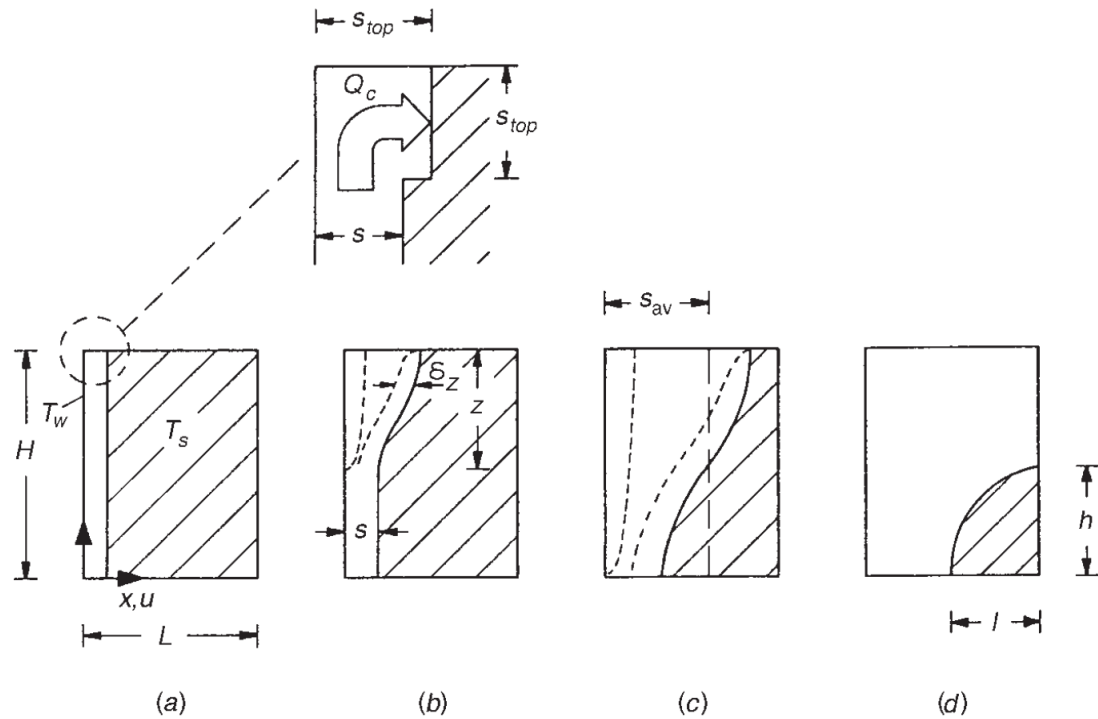


Figura 2.4: Régimen de fusión en presencia de convección natural cuando el PCM se calienta de un lado [5].

En el segundo régimen, el proceso de conducción es gradualmente reemplazado por la convección. Esto ha sido llamado régimen mixto (conducción + convección) y está caracterizado por una región líquida superior que se ha vuelto lo suficientemente amplia para que sus superficies laterales estén alineadas por una capa límite (Fig. 2.4b).

2.2.7.2 PROPAGACIÓN HORIZONTAL DEL PROCESO DE FUSIÓN EN CAVIDADES CERRADAS

En las primeras etapas del proceso de fusión (fusión dominada por conducción), la capa de líquido temprana comienza a erosionar la parte superior del frente de fusión mucho más rápido, generando una geometría similar a una piscina en la parte superior (ver detalle de la Fig. 2.4a). Esta piscina continúa creciendo horizontalmente

y después de un tiempo, toma por completo el ancho de la cavidad como una capa de líquido poco profunda. Su evolución puede apreciarse en la figura 2.5, la cual está basado en observaciones experimentales con altos números de Rayleigh ($Ra \approx 10^{10}$).

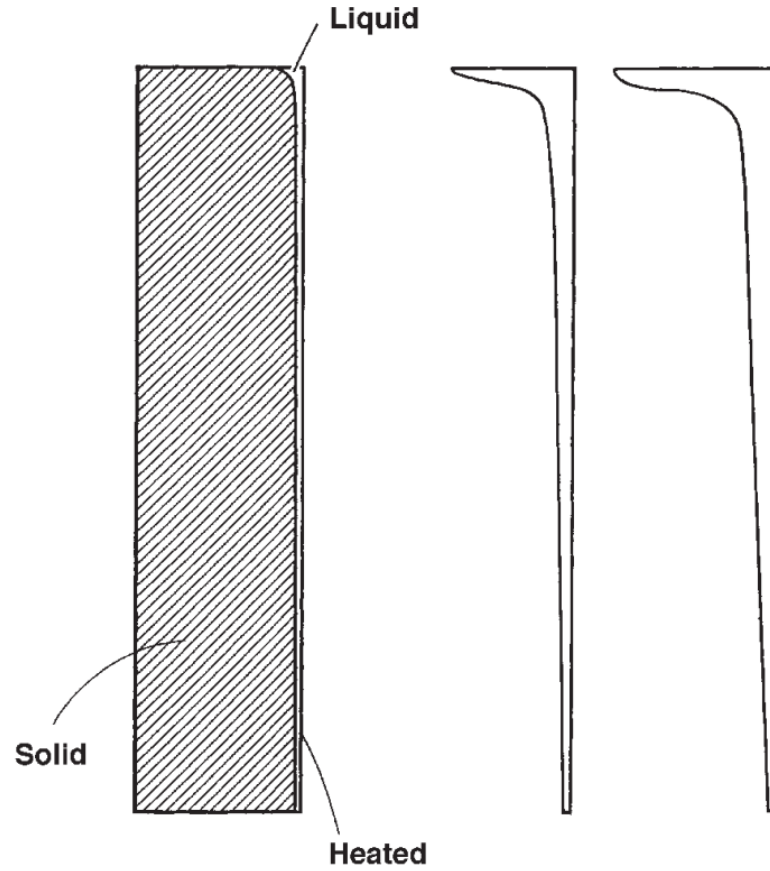


Figura 2.5: Desarrollo de una capa líquida de poca profundidad que invade en la parte superior de una bloque de n-octadecano calentado desde la derecha [5].

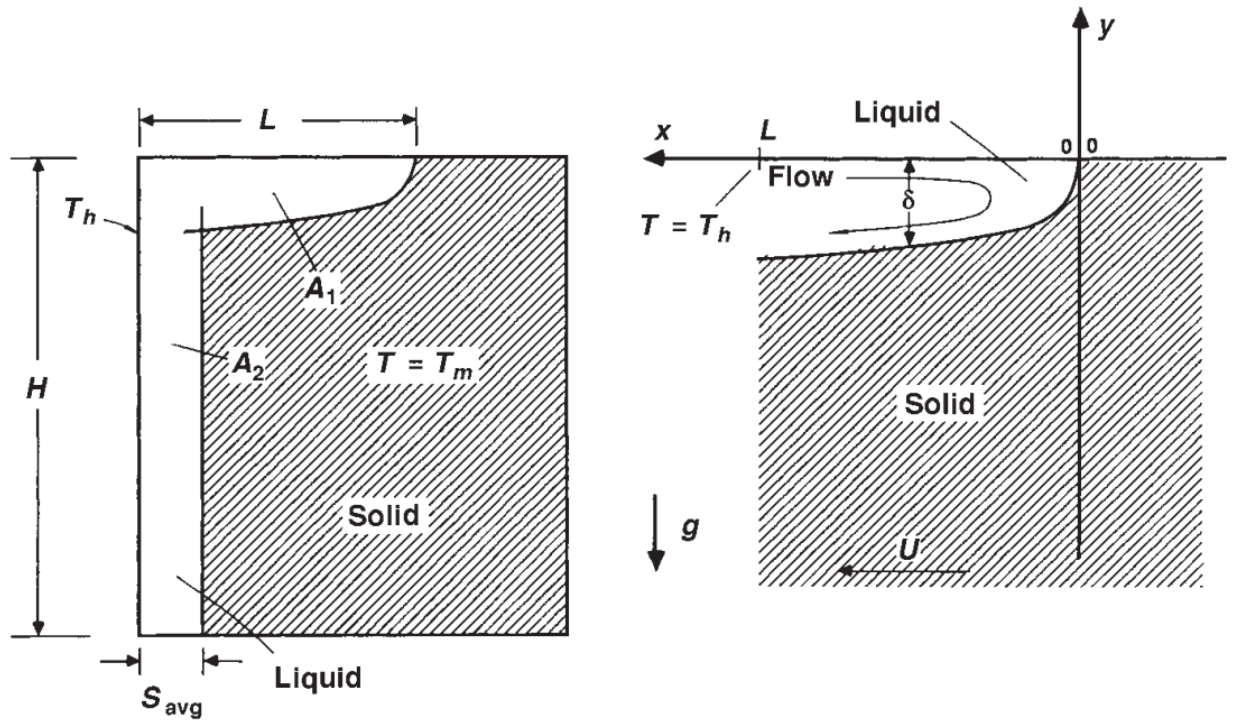


Figura 2.6: Zona líquida (A_2) junto con una capa horizontal que invade (A_1) al momento de ser calentada desde la derecha [5].

Considera una cavidad en dos dimensiones como se muestra en la Fig. 2.6. El comportamiento de dicha capa horizontal puede ser anticipada basado en un análisis de escala, y basándose en dos suposiciones claves. La primera es que las velocidades de la convección natural en el líquido sean mayores a la velocidad de fusión, $u \ll U$. Cuando esta consideración es válida, la convección natural en la capa horizontal es cuasi-estable, es decir, avanza como si la velocidad del líquido a través del frente de fusión (el efecto de fusión) fuera despreciable.

La segunda suposición es que la capa horizontal de fluido que invade sea muy delgada, $\delta \ll L$. Basado en estas suposiciones, las ecuaciones que gobiernan la conservación de masa, de momentum y de energía en la capa horizontal de fluido son:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (2.10)$$

$$\nu \frac{\partial^3 u}{\partial y^3} - g\beta \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad (2.11)$$

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (2.12)$$

Una ecuación adicional es necesaria para describir la condición de conservación de energía del frente de fusión. De acuerdo a esto, el flujo de calor por conducción que viene del lado del líquido de la interfase es balanceado por el nuevo sólido que cruza la pendiente representada $\frac{\partial \delta}{\partial x}$ de la interfase con la velocidad de fusión horizontal U .

$$k \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_{y=-\delta} = \rho h_{sf} U \frac{\partial \delta}{\partial x} \quad (2.13)$$

En esta ecuación se supone que la densidad del sólido es la misma que la densidad del líquido. El sistema seleccionado para un análisis de escala es la capa líquida (piscina de fusión) de longitud L y profundidad δ . La escala para el exceso de temperatura encima del punto de fusión es $\Delta T = T_h - T_m$, donde T_h es la temperatura de la pared izquierda en la Fig. 2.6. Con estas notaciones, podemos reescribir las ecuaciones por medio del siguiente orden de magnitud:

$$\frac{u}{L} \approx \frac{v}{\delta} \quad (2.14)$$

$$\nu \frac{u}{\delta^3} \approx g\beta \frac{\Delta T}{L} \quad (2.15)$$

$$u \frac{\Delta T}{L}, \nu \frac{\Delta T}{\delta} \approx \alpha \frac{\Delta T}{\delta^2} \quad (2.16)$$

$$k \frac{\Delta T}{\delta} \approx \rho h_{sf} U \frac{\delta}{L} \quad (2.17)$$

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA

3.1 METODOLOGÍA GENERAL

En la Fig. 3.1 se puede observar la metodología utilizada para esta investigación, en donde se comienza con una revisión de los diferentes PCMs que existen y una comparación de sus propiedades para evaluar cual de ellos serán seleccionados para el desarrollo de este trabajo. Posteriormente la preparación del modelo numérico y computacional fue desarrollado para realizar la simulación de cambio de fase numéricamente. Después se trabajó para construir el banco de pruebas experimental en donde se analizaron los diferentes materiales y componentes a utilizar, seguido de algunas pruebas preliminares. Luego se realizaron las pruebas experimentales de frente de fusión y transferencia de calor para después continuar con el uso y configuración de prueba de la técnica óptica láser PIV. Por último, luego de terminar el acoplamiento de la técnica PIV con el banco de pruebas, se procedió a realizar la medición del campo de velocidades del proceso de fusión del PCM.



Figura 3.1: Metodología de la investigación

3.2 SIMULACIÓN DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL

3.2.1 PCMs A UTILIZAR

Para esta investigación, se buscaron materiales que tuvieron un punto de fusión por debajo de los 0°C , sin embargo, debido a que muchos de ellos son difíciles de adquirir para su posterior experimentación, se propusieron tres PCMs que suelen encontrarse de manera comercial y que cumplían con lo requisitos necesarios para seleccionarlos en este estudio:

- Punto de fusión debajo de los 0°C .
- Diferentes propiedades termofísicas.

- Materiales comerciales.
- Fácil elaboración del PCM.
- Lugar disponible para hacer disposición en caso de ser un material tóxico.

Una vez que se identificaron los posibles materiales a utilizar, se propusieron tres de ellos para esta investigación. El primero de ellos es la mezcla de agua con EG, el segundo material es la mezcla es agua con PG y el tercero es una salmuera. Estas tres sustancias (EG, PG y NaCl) disminuyen el punto de fusión del agua, lo cual permite que el punto de congelación de la mezcla sea desde 0°C (temperatura de cambio de fase del agua) hasta los -60°C . Para este estudio, no es necesaria una temperatura tan baja pero sí a las temperaturas semejantes a las de un congelador convencional, para fines prácticos [51].

3.2.1.1 PROPIEDADES TERMOFÍSICAS

La propuesta de concentración de la mezcla agua con EG fue al 33wt%, la mezcla de agua con PG al 36wt% y la salmuera (mezcla de agua con NaCl) al 21wt% de concentración como materiales de cambio de fase; lo cual fija a estas tres mezclas a una misma condición: punto de fusión de -17°C aproximadamente. Las propiedades termofísicas de estos PCMs a una temperatura de -10°C se pueden ver en la Tabla 3.1, dichas propiedades sólo consideran en estado líquido del PCM ya que son las necesarias para la simulación fluidodinámica y como son mezclas no comerciales, sería necesario realizar pruebas de caracterización de los PCMs para obtener sus propiedades en estado sólido. Las propiedades fueron extraídas del código libre Coolprop [6].

Propiedad termofísica	EG	PG	NaCl	Unidad
T_{melt}	-17.1	-17.1	-17.8	°C
ρ_l	1054.31	1039.42	1169.1	kg/m ³
k_l	0.411	0.397	0.532	W/m·K
$c_{p,l}$	3560	3765	3340	J/kg·K
μ	7.18	17.6	3.97	mPa·s
h_{melt}	280	260	295	kJ/kg

Tabla 3.1: Propiedades termofísicas de la mezcla de agua con EG al 33wt %, con PG al 36wt % y con NaCl al 21wt %.

En las tablas 3.2 - 3.4 se muestra las variaciones de las propiedades en función de la temperatura de la mezcla de agua con EG al 33wt %, con PG al 36wt % y con NaCl al 21wt %, respectivamente:

Propiedad	Grado de la ec.	R ²	Ecuación
ρ_l	2	0.9976	$=-0.002460787T^2 + 1.017712T + 955.18$
k_l	1	0.9999	$=0.0008365T + 0.2067$
Cp_l	2	1.0000	$=-0.0059T^2 + 6.7389T + 2193.9$
μ_l	4	0.9998	$=2.12999 \times 10^{-10}T^4 - 2.84352 \times 10^{-7}T^3 + 1.42286 \times 10^{-4}T^2 - 3.16483 \times 10^{-2}T + 2.64279$

Tabla 3.2: Variación de las propiedades termofísicas en función de la temperatura de la mezcla agua con EG al 33 %.

Propiedad	Grado de la ec.	R ²	Ecuación
ρ_l	2	0.9983	$=-2.07473 \times 10^{-3} T^2 + 0.706552 T + 999.685$
k_l	1	1.000	$=7.04514 \times 10^{-4} T + 0.211409$
Cp_l	2	0.9991	$=-0.0017 T^2 + 4.0155 T + 2740.8$
μ_l	5	0.9999	$=-1.4094360768 \times 10^{-11} T^5 + 2.3150168284 \times 10^{-8} T^4 -$ $1.5186177039 \times 10^{-5} T^3 + 4.9740141673 \times 10^{-3} T^2 -$ $0.81362004046 T + 53.187409849$

Tabla 3.3: Variación de las propiedades termofísicas en función de la temperatura de la mezcla agua con PG al 36 %.

Propiedad	Grado de la ec.	R ²	Ecuación
ρ_l	1	0.9985	$=-0.4558 T + 1289.1$
k_l	1	0.9999	$=0.0015 T + 0.1336$
Cp_l	2	1.0000	$=-0.0161 T^2 + 10.426 T + 1712$
μ_l	5	0.9989	$=-2.412363 \times 10^{-8} T^3 + 2.207062 \times 10^{-5} T^2 -$ $6.754193 \times 10^{-3} T + 0.6926216$

Tabla 3.4: Variación de las propiedades termofísicas en función de la temperatura de la mezcla agua con NaCl al 21 %.

A continuación, en las Figs. 3.2 - 3.6 se muestran los gráficos en donde se evaluaron las diferencias entre las propiedades termofísicas y el punto de fusión de los tres PCMs:

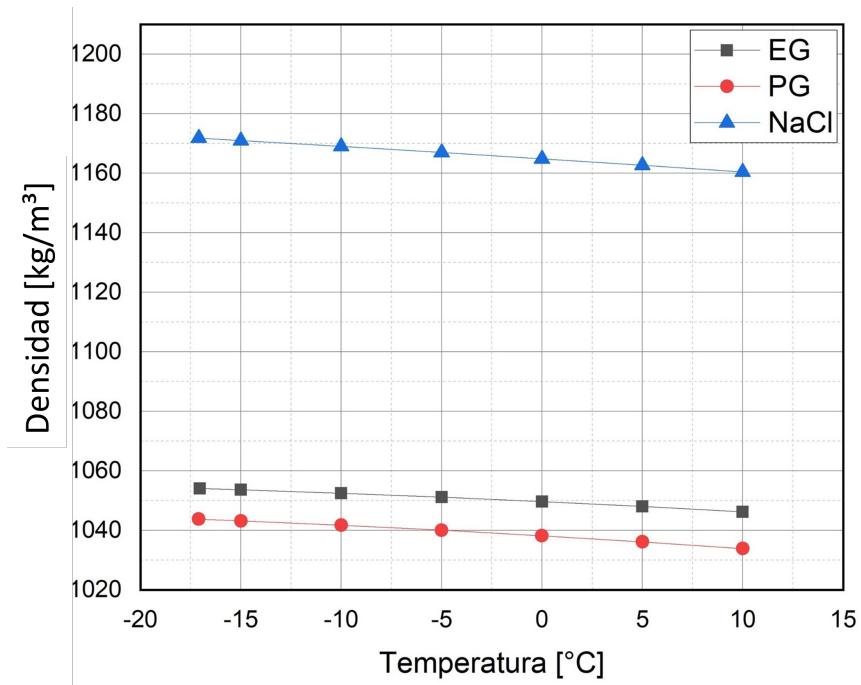


Figura 3.2: Variación de la densidad en función de la temperatura de los tres PCMs.

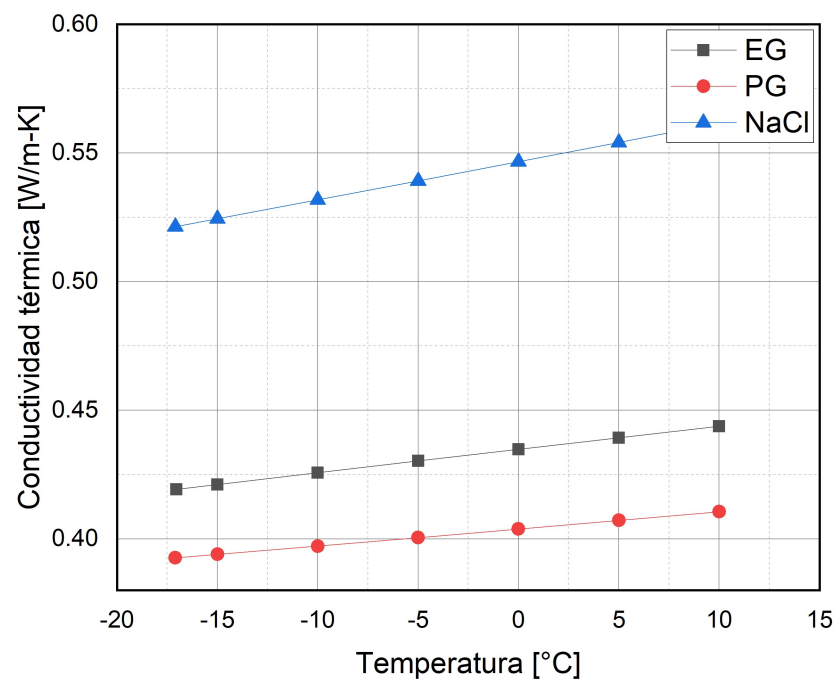


Figura 3.3: Variación de la conductividad térmica en función de la temperatura de los tres PCMs.

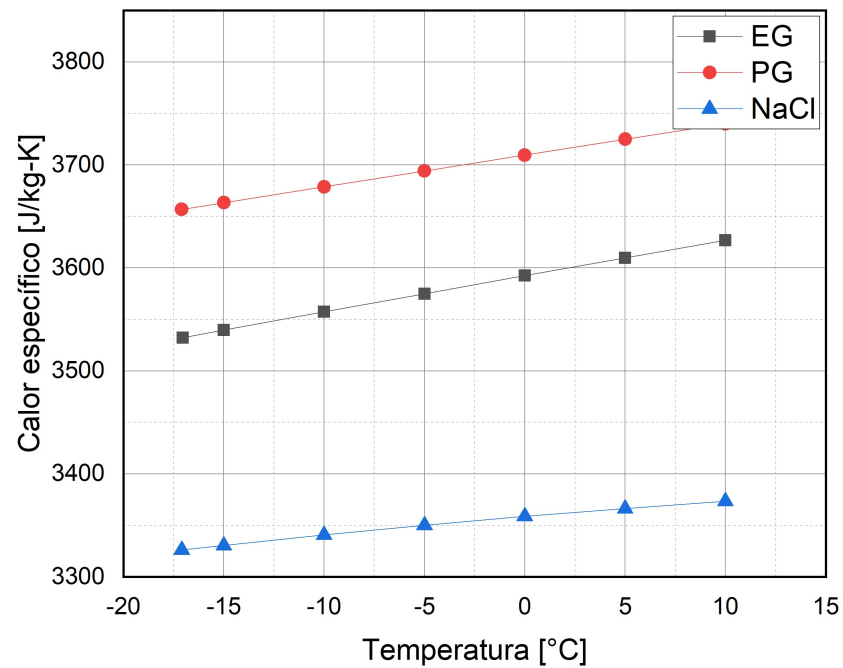


Figura 3.4: Variación del calor específico en función de la temperatura de los tres PCMs.

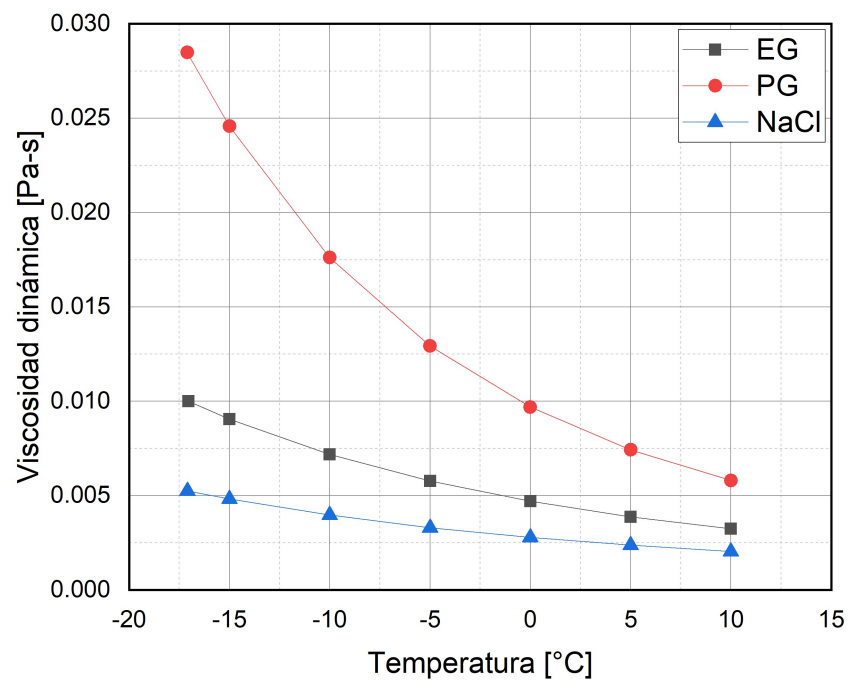


Figura 3.5: Variación de la viscosidad dinámica en función de la temperatura de los tres PCMs.

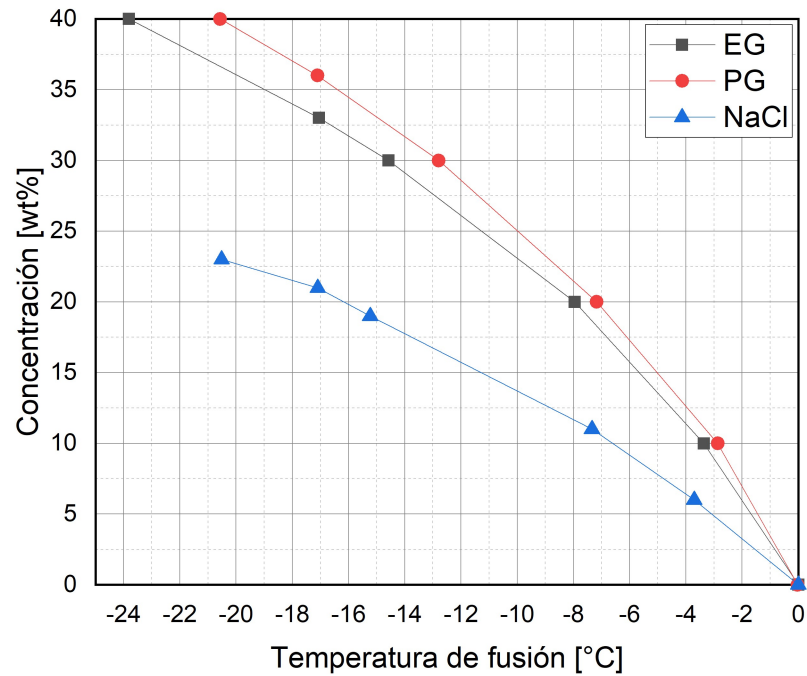


Figura 3.6: Variación del punto de fusión en función de la concentración de los tres PCMs.

3.2.2 MODELO GEOMÉTRICO

El fenómeno de cambio de fase se ha modelado en dos dimensiones, debido a que se ha reportado que predice adecuadamente dicho proceso [81]. Para el análisis, se propuso una cavidad cuadrada de altura 0.1 m, manteniendo una relación de aspecto de 1.5 ($\Gamma=1.5$). Las caras superior, inferior y lateral derecha se encuentran completamente aisladas y la superficie izquierda estará en una condición isotérmica de -7°C .

Para las condiciones iniciales tenemos que:

- Para $t = 0$ s, $T_{ini} = -18^{\circ}\text{C}$
- Para $t = 0$ s, $u = v = 0$ m/s.

Las condiciones de frontera en el sistema son:

- No deslizamiento en las paredes, $u = v = 0$ m/s.
- La pared izquierda es isotérmica, $T = T_w = -7$ °C.
- El resto de las paredes se encuentran aisladas.

En la Fig. 3.7 se muestra la geometría del modelo a estudiar.

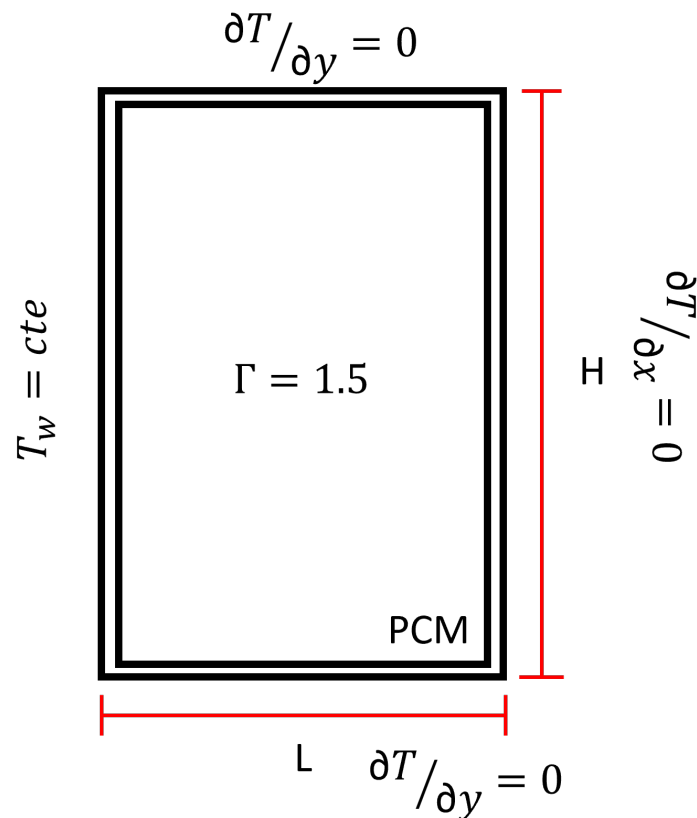


Figura 3.7: Geometría de simulación computacional.

3.2.3 ECUACIONES DE GOBIERNO

La transferencia de calor que ocurre en una cavidad llena de un material de cambio de fase está gobernada por las tres ecuaciones de conservación: continuidad,

momentum y energía.

Ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \quad (3.1)$$

Ecuación de conservación de momentum en x :

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + S_x \quad (3.2)$$

Ecuación de conservación de momentum en y :

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} = -\frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + S_y + S_b \quad (3.3)$$

Ecuación de la energía:

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u h)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v h)}{\partial y} = \nabla \cdot k \left(\frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y} \right) - S_h \quad (3.4)$$

donde S_x , S_y y S_h son términos fuente para simular el fenómeno de cambio de fase descrito por el modelo entalpía-porosidad de Voller[70], dicho modelo fue utilizado debido a que el software para realizar la simulación computacional los utiliza, cabe resaltar que es el más utilizado hoy en día desde que se presentó en 1987. Estas ecuaciones se encuentran acopladas entre sí, por lo que es necesario resolverlas simultáneamente mediante un método numérico. La principal característica de este método se basa en la representación de la evolución del calor latente y la dinámica del flujo bajo condiciones de convección-difusión en regiones de transición de sólido-líquido en problemas de cambio de fase por medio de términos fuente apropiados.

Los términos fuente S_x y S_y son usados para modificar las ecuaciones de cantidad de movimiento en la región sólido-líquido. Si es asumido que el flujo en dicha zona es gobernada por la ley de Darcy, i.e.

$$\mathbf{u} = -(K/\mu)\nabla P \quad (3.5)$$

donde K , es la permeabilidad en función de la porosidad. Conforme la porosidad decrece, la permeabilidad y la velocidad superficial también lo hará, disminuyendo hasta cero que es cuando la zona de sólido-líquido se convierte completamente en fase sólida. En el modelo número este comportamiento se define con los términos fuente de las ecuaciones de conservación de la cantidad de movimiento:

$$S_x = -Au \quad \text{and} \quad S_y = -Av \quad (3.6)$$

donde A incrementa de cero a un valor grande cuando la fracción sólida toma un valor líquido de cero hasta un valor sólido de 1, el cual se observa en la siguiente ecuación:

$$A = -\frac{C(1-\lambda)^2}{\lambda^3 + q} \quad (3.7)$$

donde λ es la fracción líquida (cantidad de material en estado líquido en función de la cantidad total del material), la constante C depende de la morfología del medio poroso, generalmente asumido como 1×10^3 y q solamente introducido para evitar una división entre cero, su valor es 0.001.

El término fuente S_b en la ecuación de conservación de momentum en y es un término de flotación utilizado para inducir la convección natural en la cavidad. Asumiendo la ecuación de Boussinesq, i.e. densidad constante en todos los términos excepto en un término fuente gravitacional, la término fuente de flotación es dado por:

$$S_b = \rho g \beta (h - h_{ref}) / Cp \quad (3.8)$$

donde β es el coeficiente de expansión térmico y h_{ref} es un valor de referencia del calor sensible.

Por último, el término fuente de entalpía de la ecuación de conservación de energía es derivado de la formulación de la formulación de entalpía de cambio de fase de convección-difusión:

$$S_h = \frac{\partial H}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \Delta H) \quad (3.9)$$

donde ΔH es la entalpía total.

La entalpía específica que toma parte dentro del sistema es la suma del calor sensible y el calor latente

$$h_{sistema} = h_{sen} + h_{sf} \quad (3.10)$$

donde el calor sensible es:

$$h_{sen} = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T c_p \cdot dT \quad (3.11)$$

y el calor latente contenido se utiliza mediante la siguiente expresión:

$$h_{lat} = \lambda h_{melt} \quad (3.12)$$

donde la fracción líquida λ se describe de la siguiente manera

$$\lambda = \begin{cases} 0 & , \quad T < T_s \\ \frac{T-T_s}{T_l-T_s} & , \quad T_s < T < T_l \\ 1 & , \quad T > T_l \end{cases} \quad (3.13)$$

3.2.4 MODELO NUMÉRICO

Para realizar el modelo numérico se utilizó el software ANSYS Student 2022 R2. Los modelos activados fueron únicamente la ecuación de la energía y el modelo de solidificación / fusión. El solucionador escogido fue el basado en densidad. El método de acoplamiento de la presión con la velocidad utilizado fue el algoritmo SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) desarrollado por Patankar y Spalding en 1972 con un esquema de discretización especial PRESTO! para la presión y de segundo orden para las otras ecuaciones.

Los coeficientes de bajo-relajación no fue necesario modificarlos sino dejarlos en la configuración por definición, sin embargo, cuando era requerido, se modificaban ligeramente estos factores, generalmente en las ecuaciones de presión y en energía, con un método de inicialización estándar. En la Fig.3.8 se puede ver la generación de un reporte para que cada 30 segundos, se extraigan de la solución el tiempo, transferencia de calor, fracción líquida y máxima velocidad del proceso de fusión, esto, con la finalidad de calcular posteriormente el número de Nu y trazar la velocidad del proceso. También fue necesario crear un reporte similar para capturar el frente de fusión y posteriormente, compararlo con las otras sustancias.

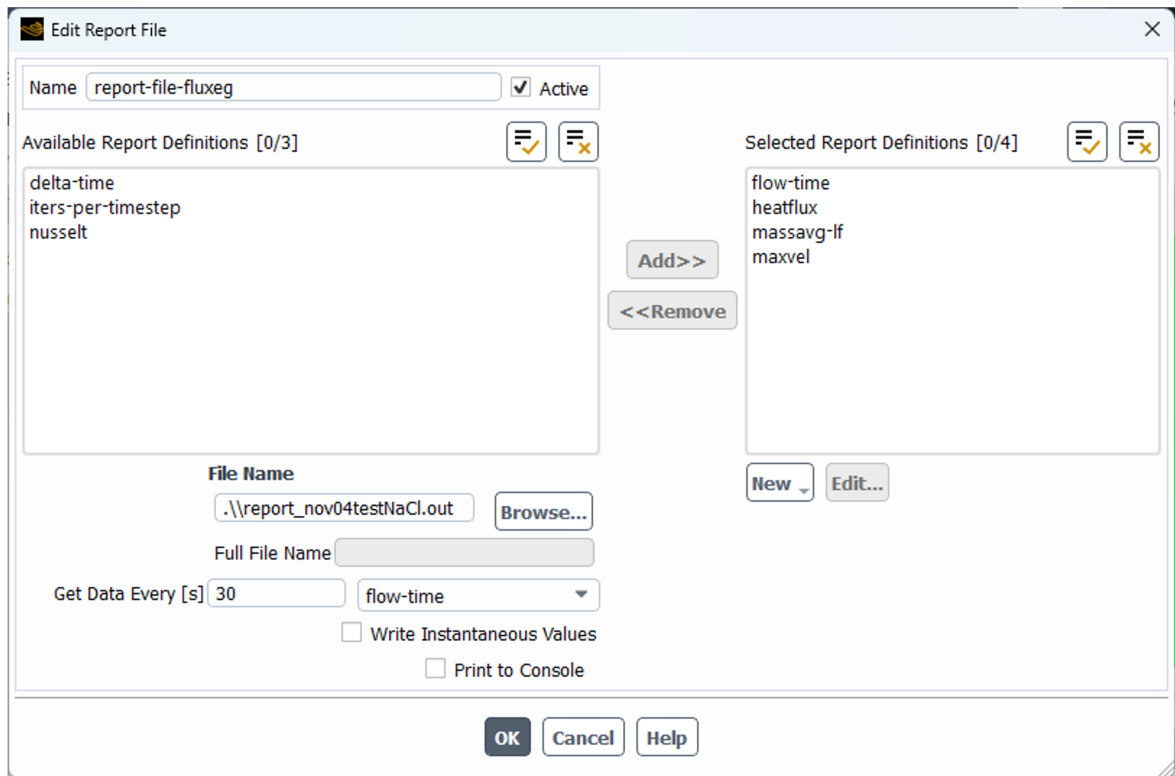


Figura 3.8: Reporte generado para la obtención de datos.

3.2.5 VALIDACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO

Una de las estrategias para asegurar que un modelo numérico sea confiable es realizando un análisis de dependencia de malla, en donde se crean diferentes densidades de malla de la discretizaciones del modelo, en donde se busca variar el tamaño de la malla, número de elemento y hasta el método de mallado. Agregando a esto, cuando se realiza un análisis en estado transitorio, se varía también el paso del tiempo, número de iteraciones por paso de tiempo, sin mencionar los métodos para la solución de las ecuaciones de gobierno. Para realizar dicha validación, es necesario encontrar los pasos de tiempo para la simulación transitoria, por lo que es necesario introducir el número de Courant. Este número, también llamada la condición CFL (Courant Friedrichs-Lewy, introducida en 1928), es sumamente esencial para resolver ecuaciones diferenciales parciales dominadas por el tiempo, el cual suele ser menor

a 1.0 durante el arranque de la simulación, pero puede ser mayor una vez que la solución continúa [24]. El número de Co es calculado de la siguiente manera:

$$Co = \frac{\frac{\Delta t}{\Delta x}}{u} \quad (3.14)$$

Una vez experimentado con cierto pasos de tiempo y cierto números de Courant en varias etapas de la simulación, la solución más favorable para la solución es la que está mostrada a continuación:

Tiempo de simulación	u_{prom}	ΔT	Co
0-60 s	0.7384 mm/s	0.3 s	0.443
61 - 600 s	3.764 mm/s	0.6 s	4.5
601 - 3600 s	3.72 mm/s	1.0 s	7.44
3601s - Fusión	0.8	2 s	3.2

Tabla 3.5: Números de Courant aceptables correspondientes a cada etapa de la solución numérica.

Una vez obtenido el paso de tiempo aceptable, se procedió a comparar cinco diferentes tamaños de elemento para el mallado del modelo geométrico, comparando el porcentaje de variación promedio de la transferencia de calor promedio y el tiempo de simulación total hasta que la fracción líquida fuese de 1.0. Estos resultados se pueden ver en la Tabla 3.6

Tamaño de elemento(mm)	Número de elementos	Porcentaje variación	Tiempo de simulación (h)
0.1	600 000	N/A	20* (diverge la solución)
0.25	96 000	5.3 %	59.3
0.5	24 000	11.3 %	30.5
0.6	16 800	33.8 %	11.8
0.75	10 720	Punto de partida	12.2
1.0	6 000	No convergencia	N/A

Tabla 3.6: Dependencia de malla en comparación con la malla de tamaño de elemento de 0.5mm. *al 10 % del proceso de fusión

Cabe resaltar que en los casos que no convergió la solución, se trató de un desbalance superior a 10 de las ecuaciones de conservación.

Y con estos resultados, se obtuvo un modelo definitivo, tomando el tamaño de elemento de 0.5mm, el cual fue validado con una investigación experimental, desarrollada por Shokouhmand et. al. [65], donde realizaron un pruebas de fusión de cambio de fase usando ácido láurico como PCM en una cavidad de tamaño 12x5x1cm de alto, ancho y profundidad, respectivamente. Se tomaron los resultados del número de Nu en el caso experimental de la cavidad que no tiene aletas y se comparó con los resultados obtenidos bajo los mismos parámetros con nuestro modelo numérico aceptable. La Tabla 3.7 muestra las propiedades del PCM tomadas.

Propiedades	Valor	Unidad
T_m	43.5/48.2	°C
ρ_l	885	kg/m^3
k_l	0.14	W/m K
$c_{p,l}$	2 390	J/kg K
μ	5.93	mPa s
h_{sf}	187.21	kJ/kg

Tabla 3.7: Propiedades termofísicas del Acido Láurico [65].

En la Fig. 3.9 podemos observar la comparación del Nu del modelo propuesto y la investigación experimental bajo los mismos parámetros y dimensiones, de propiedades de la sustancia, condiciones iniciales, entre otros. A pesar de la variación que existe, esto pudo deberse a que se consideró la viscosidad constante y no dependiente de la temperatura, asumiendo que nuestro modelo predice muy bien el fenómeno de cambio de fase, validando parcialmente dicho modelo en el proceso de fusión.

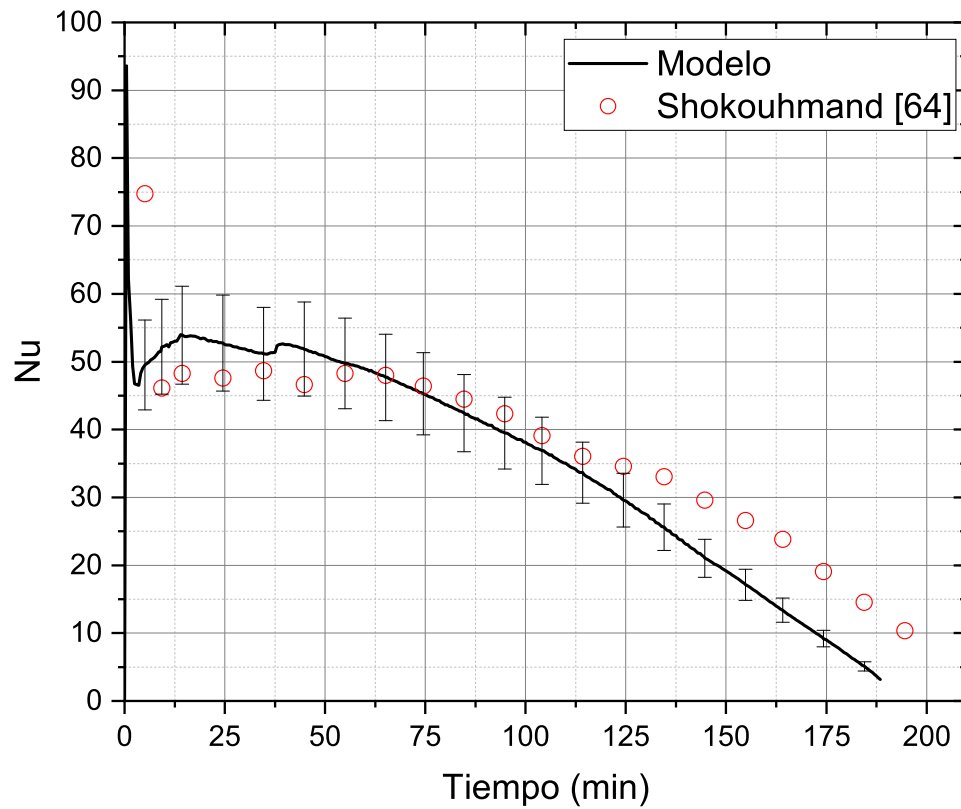


Figura 3.9: Validación experimental del modelo numérico presentado, 13.38 % error.

3.3 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

3.3.1 MODELO 3D CONCEPTUAL DE LA CAJA DE AISLANTE Y LA CAVIDAD

El primer paso para comenzar con la construcción del banco experimental, es realizar un modelo 3D. Para este modelo, fue necesario crear un concepto del recinto donde se planea controlar la temperatura, dado que la fuente de calor es por

convección natural y debe mantener una temperatura constante de 5°C. Para ello, primero se dibujó un concepto en 2D, para representar la caja y evaluar si la idea era aceptable. En la Fig. 3.10 se muestra el concepto, estando compuesto por paredes de aislante rígido de poliestireno y un sistema de refrigeración para acondicionar la caja, el cual es necesario que tenga un evaporador posicionado en la parte superior izquierda, cubierto de su lado derecho por una pared, para generar un canal de fluido de aire frío que permita que la zona que está en contacto con la cavidad esté controlada, como se muestra en la Fig. 3.10.

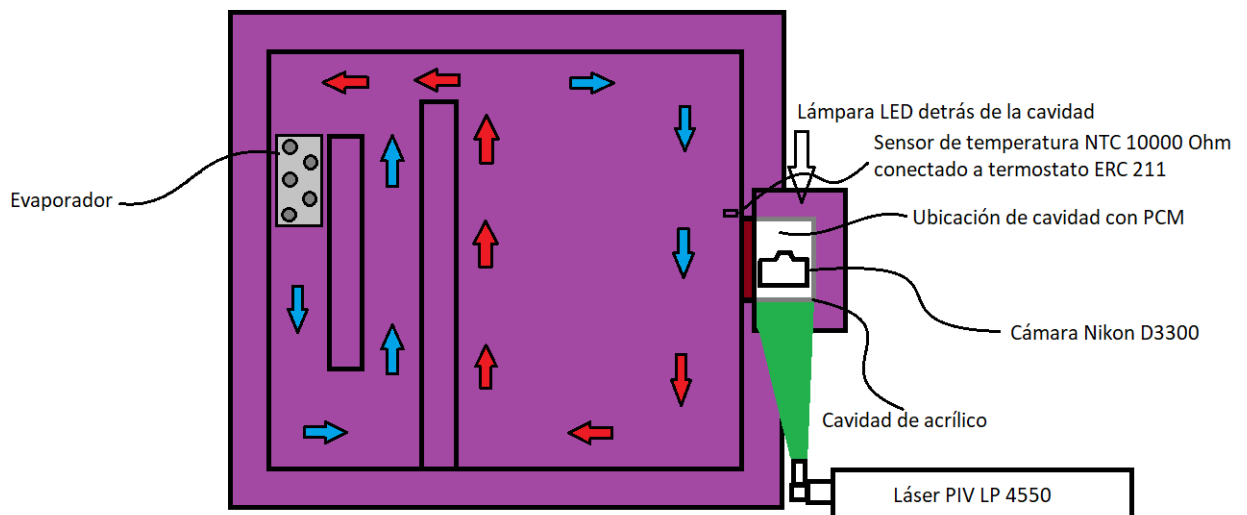


Figura 3.10: Concepto recinto a temperatura controlada

Posteriormente, se realizó el modelo tridimensional de la caja, dándole dimensiones de 70 cm por cada lado (ancho, altura y profundidad), generando así una caja cúbica y a un costado, otra caja que cubra la cavidad de acrílico para mantener aislado también el PCM. En la Fig. 3.11, se puede observar el modelo tridimensional realizado, donde también se encuentran numeradas las paredes de dicha caja.

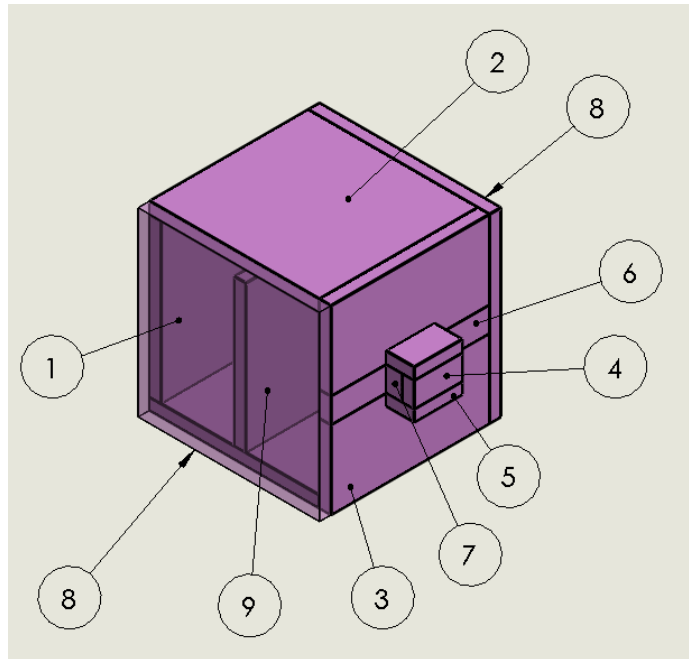


Figura 3.11: Modelo de la caja de aislante y numeración de las paredes

Para encapsular el PCM es necesario una cavidad cerrada y sellada para evitar que tenga fugas, además debe ser un material aislante que contribuya a la baja transferencia de calor entre el PCM y el ambiente exterior. Es necesario también que una de las caras sea transparente para poder tomar fotografías al frente de fusión. Es por eso que se decidió encapsular el PCM con una cavidad de acrílico de 6 mm de espesor, como se muestra en la Fig. 3.12.

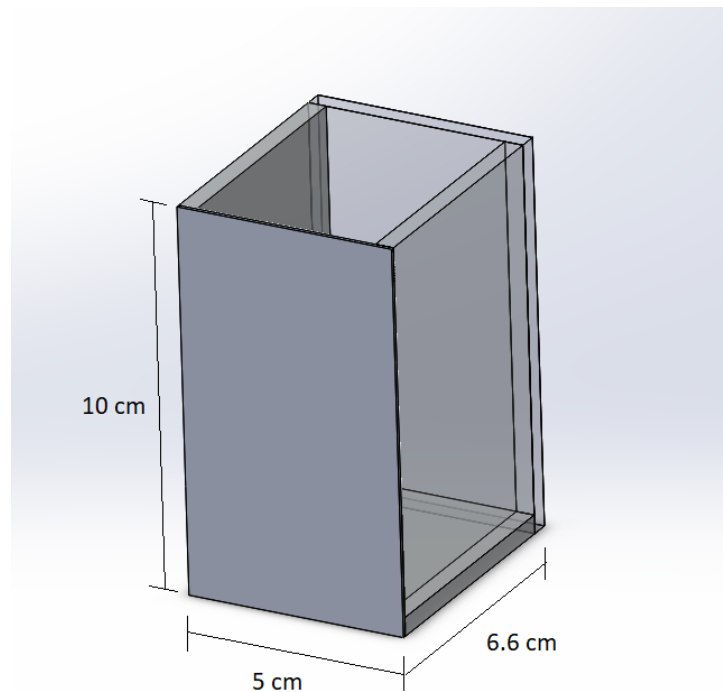


Figura 3.12: Modelo de la cavidad de acrílico

Otra de las caras de esta cavidad necesita ser de un material que, a pesar de tener un espesor pequeño, sea un buen conductor térmico ya que ésta cara será la que transfiera el calor entre la fuente de calor y el PCM, por lo tanto se optó por el uso de una placa de aluminio calibre 13 (3.048 mm de espesor) como conductor entre ambos.

3.3.2 SISTEMA DE REFRIGERACIÓN

Para alcanzar la temperatura de la fuente de calor por convección a 5°C , es necesario realizar el diseño e instalación de un sistema de refrigeración dentro del recinto de ambiente controlado.

3.3.2.1 UNIDAD CONDENSADORA

El compresor utilizado para el sistema es de la marca Embraco modelo EM3D60HLT. Este compresor es de tipo hermético para uso frigorífico o doméstico, opera entre 115V y 127V a una frecuencia de 60Hz con un Amperaje de Rotor Bloqueado (LRA, por sus siglas en inglés) de 10.15 A. El fluido de trabajo con el cual funciona este dispositivo es el refrigerante R134a.



Figura 3.13: Compresor Embraco EM3D60HLT

El condensador utilizado es de tipo tubo y alambre. Esta clase de condensadores han sido desarrollados para este tipo aplicaciones en refrigeradores domésticos debido a que son compactos y muy eficientes. Se encuentra conectado con el compresor descrito anteriormente, el cual cuenta con un ventilador colocado en medio del compresor y del condensador de estos dos que tiene la función de enfriar el fluido para que se condense y posteriormente pase a la válvula de expansión. Estos dos componentes juntos forman la unidad condensadora del sistema de refrigeración.

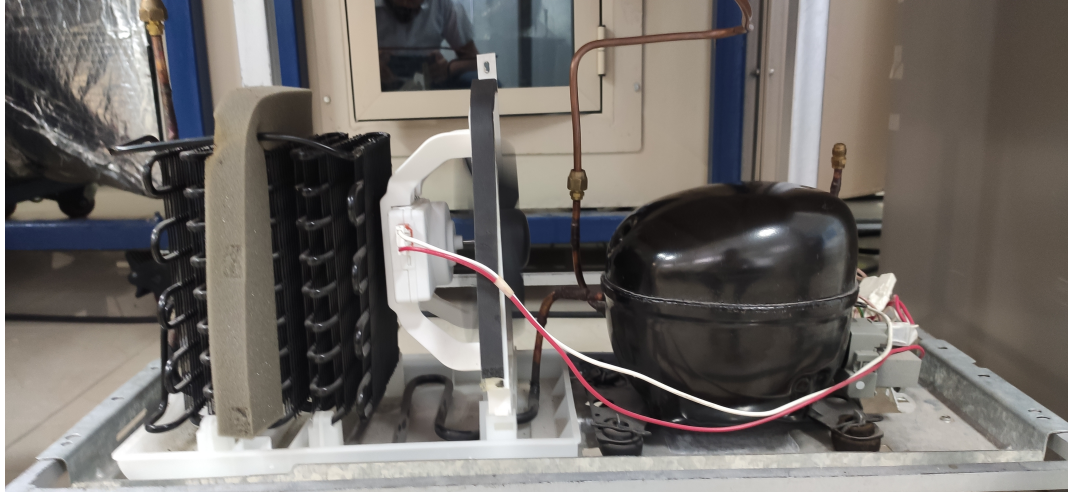


Figura 3.14: Unidad condensadora

3.3.2.2 VÁLVULA DE EXTRANGULACIÓN

Como todo sistema de refrigeración por compresión de vapor, es necesario un elemento que estrangule o permita la expansión del fluido condensado y comprimido para que permita la evaporación y absorción de energía del medio a refrigerar. Para este dispositivo se utilizó una válvula de aguja, ya que al tenerla casi completamente cerrada, cumple con la función de estrangular el refrigerante y pueda hacer descender su temperatura. La válvula de aguja utilizada es de la marca Danfoss con modelo 148b4140 con un tamaño de 1/4" FPT x 1/4" MPT, como se muestra en la imagen.

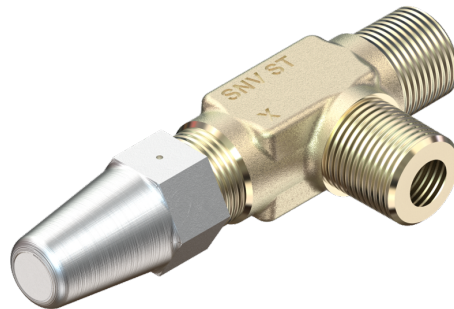


Figura 3.15: Válvula aguja 148b4140

3.3.2.3 EVAPORADOR

Se utilizó un evaporador tipo tubo y aleta, que son también comúnmente utilizados para la refrigeración doméstica, en este caso, se obtuvo uno que era empleado en un congelador que utilizaba también un circuito con refrigerante R134a. Este evaporador cuenta con unas dimensiones de 70x530x180mm con un número total de aletas de 38. El evaporador cuenta con un volumen de $0.2697 m^3$.

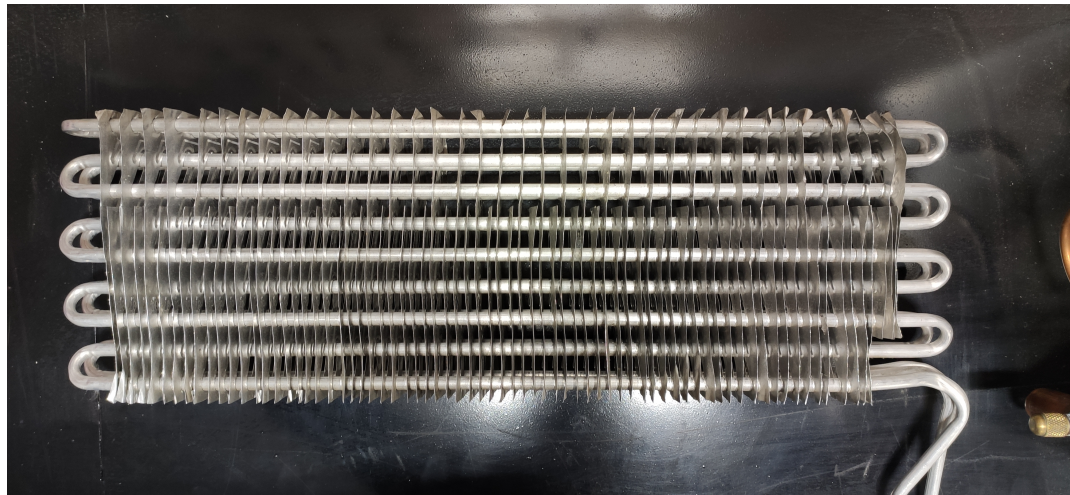


Figura 3.16: Evaporador para el sistema de refrigeración

3.3.2.4 TERMOSTATO

Para controlar la temperatura del ambiente dentro del recinto, es necesario el uso de un termostato. Esto permitirá que la condición de la fuente de calor por convección sea controlado y casi estable. El termostato utilizado es de la marca Danfoss modelo ERC 213, mostrado en la Fig. 3.17. El ERC 213 es un controlador de refrigerador multifuncional inteligente con funciones de gestión de la temperatura y el desescarche con tres relevadores. Cuenta también con funciones para controlar la ventilación del condensador y el encendido/apagado del compresor. Debido a la simplificación del proceso del sistema de refrigeración, solamente se utilizó un relevador que controla el encendido y apagado del compresor, y con ello, mantener

la temperatura del ambiente dentro de la caja de aislamiento térmico.



Figura 3.17: Controlador de refrigeración electrónico ERC 213

En la Fig. 3.18 se muestra el diagrama de conexión de este controlador de temperatura, donde la única salida digital que se usó fue la DO1, que es la que controla el encendido y apagado del compresor, también se utilizó la entrada para el sensor del aire (Sair), donde se conectó un sensor RTD (NTC 10000 Ohm a 25°C) que mide la temperatura del aire justo en el lugar donde está la fuente de calor de la cavidad del PCM.

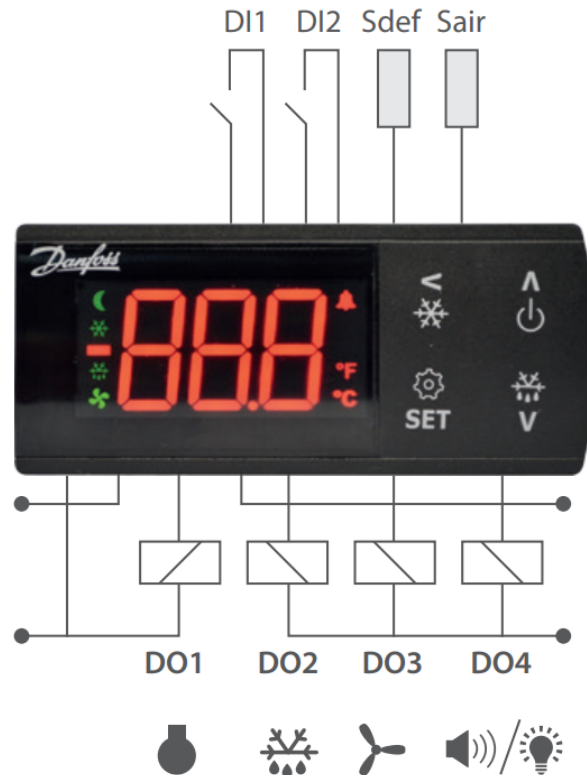


Figura 3.18: Diagrama de conexión del controlador ERC 213

3.3.3 CONSTRUCCIÓN DEL BANCO EXPERIMENTAL

3.3.3.1 CORTE DE PAREDES DE LA CAJA

Para la construcción del banco experimental, se utilizó la espuma rígida de poliestireno (FOAMULAR®) de 2" de espesor. Esta espuma nos ayuda a mantener la temperatura interna del recinto casi constante, con el fin de lograr la temperatura deseada sin grandes alteraciones.

Después de la compra de los materiales a utilizar, se realizaron los cortes de la espuma rígida con una pistola corta foam, esta pistola puede cortar este tipo de materiales fácilmente, gracias a que se calienta un filamento de Nicromel y este que-

ma la espuma y posteriormente separa la unión natural del material. Con la ayuda de dos perfiles de aluminio, se realizaron los cortes para la construcción de la caja, como se muestra en la Fig. 3.19

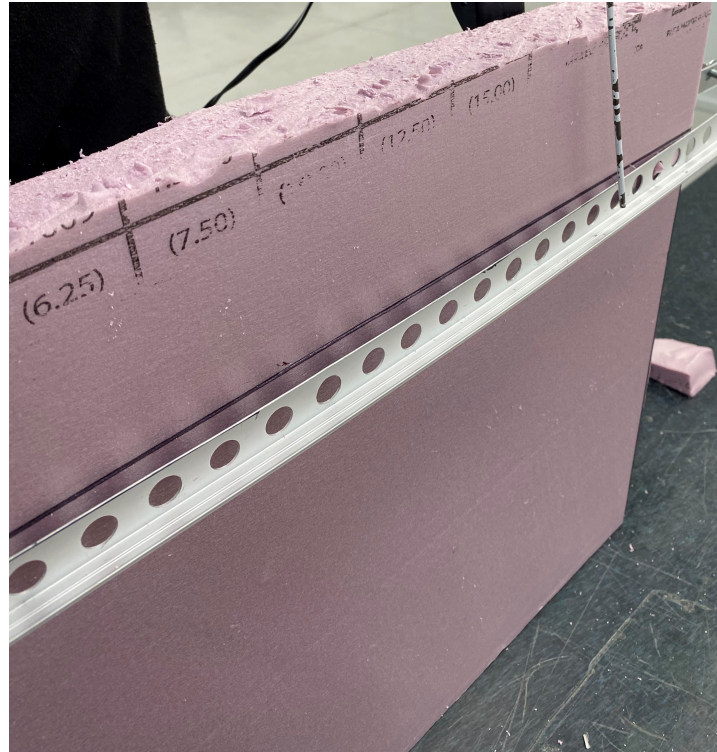


Figura 3.19: Corte de espuma rígida para fabricación de la caja

3.3.3.2 CONSTRUCCIÓN DE LA CAVIDAD

Para la construcción de la cavidad, se realizaron los cortes con una navaja especial para cortar acrílico, como se ve en la Fig. 3.20, el corte se realiza pasando reiteradas veces la navaja en el acrílico hasta generar un surco mayor a la mitad del espesor de la hoja de acrílico y posteriormente hacer presión en la línea de corte para lograr tener todas las caras de la cavidad de acrílico.



Figura 3.20: Corte de de acrílico con navaja

Para pegar las piezas de acrílico, se utilizaron dos tipos de adherentes, uno es un pegamento especial para unir acrílico, este nos asegura una correcta sujeción, dándole rigidez a la cavidad en un amplio rango de temperatura. Posteriormente fue necesario el uso de un sellador acrílico transparente, para mitigar las fugas del PCM al llenar la cavidad, como se muestra en la Fig. 3.21.



Figura 3.21: Cavity de acrílico

3.3.3.3 INSTALACIÓN DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN

Una vez realizados los cortes de la espuma rígida, se procedió a unirlos con cinta de larga duración para la posterior instalación de los componentes del sistema de refrigeración, especialmente el evaporador y la válvula de estrangulación. En el lado interno de la pared 1, fue instalado un soporte para colocar el evaporador, como se muestra en la Fig. 3.22, y asegurar la rigidez de este cuando se instale la tubería de todo el sistema.

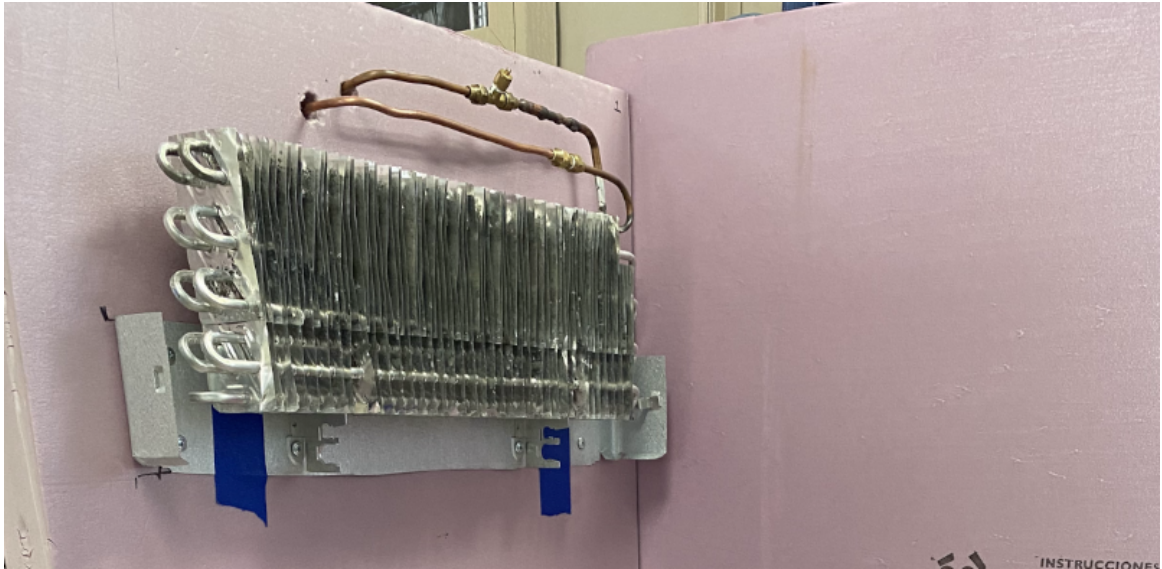
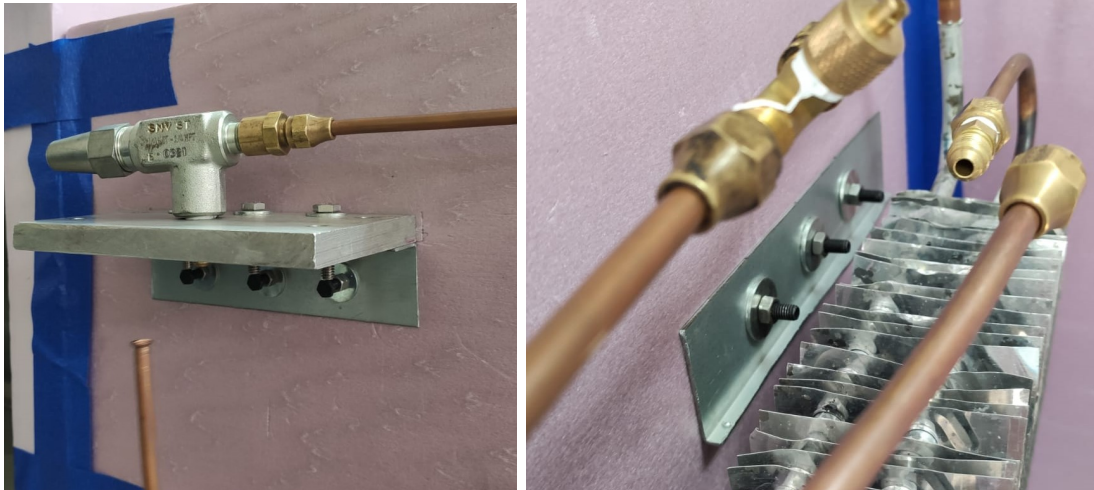


Figura 3.22: Soporte del evaporador

En ambos lados de la pared 1, fueron instalados dos ángulos de aluminio para soportar la base donde fue instalada la válvula de estrangulación del sistema. En la Fig. 3.23 se observa cómo fue posicionada la válvula, donde la entrada está en dirección hacia la salida del condensador (vertical) y la salida de la válvula en dirección hacia el evaporador (horizontal). Una vez instalada esta base y la válvula, solamente queda posicionar la unidad condensadora para realizar el ruteo de la tubería del sistema.

Para la instalación de la tubería y unir los componentes del sistema de refrigeración, se utilizó tubería de cobre flexible de 1/4", este tipo de tubería y tamaño, es comúnmente usado en la refrigeración doméstica.

Se realizó la conexión necesaria entre los distintos componentes, al existir una unión mecánica entre el compresor y el condensador, se condujo el cierre del circuito, conectando la salida del compresor con la entrada de la válvula de estrangulación (línea líquida), la salida de la válvula con la entrada del evaporador, y la salida del evaporador con la entrada del compresor (línea de succión). En la Fig. 3.25 se puede ver el circuito final interconectado, para lo cual se usó cerca de 5 metros de tubería



(a) Ángulo de pared externa

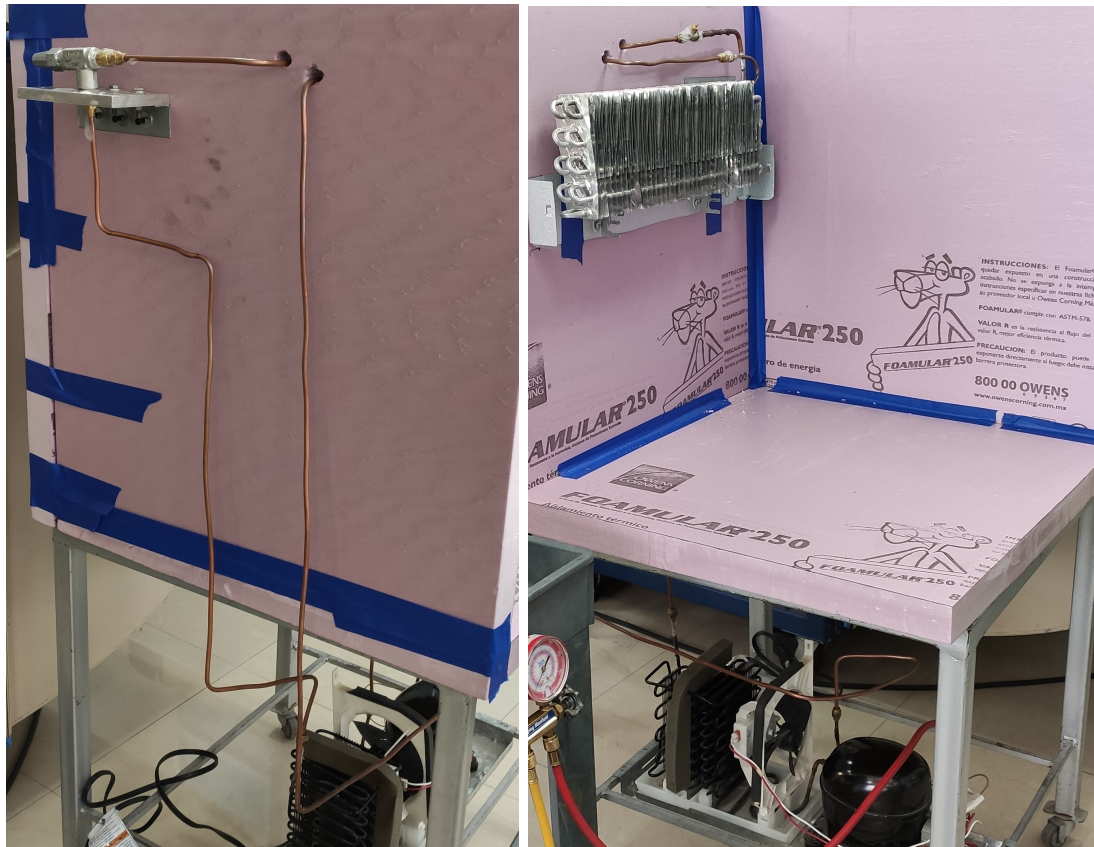
(b) Ángulo pared derecha

Figura 3.23: Ángulos de aluminio para soporte de válvula



Figura 3.24: Tubería flexible de cobre de 1/4"

flexible de cobre, 6 tuercas flare de 1/4" y 2 niples campana de 1/4" MPT a 1/4" flare.



(a) Parte externa de la tubería

(b) Parte interna de la tubería

Figura 3.25: Instalación del sistema de refrigeración

3.3.4 ADQUISICIÓN DE DATOS

Para el sistema de adquisición de datos se utilizó el software NI Labview 2014 ©, que es una plataforma y entorno de desarrollo para diseñar múltiples sistemas, con un lenguaje de programación visual gráfico pensado para hardware y software de pruebas, control y diseño. En este caso, un código fue desarrollado para el monitoreo y lectura de temperatura en los diversos casos y pruebas desarrolladas, como se observa en la Fig. 3.26.

El hardware utilizado es un sistema de instrumentos modulares llamado PXI, está computadora está diseñada para ser usada con el software NI Labview. También cuenta con diferentes módulos de lectura de datos, entre los cuales fueron utilizados

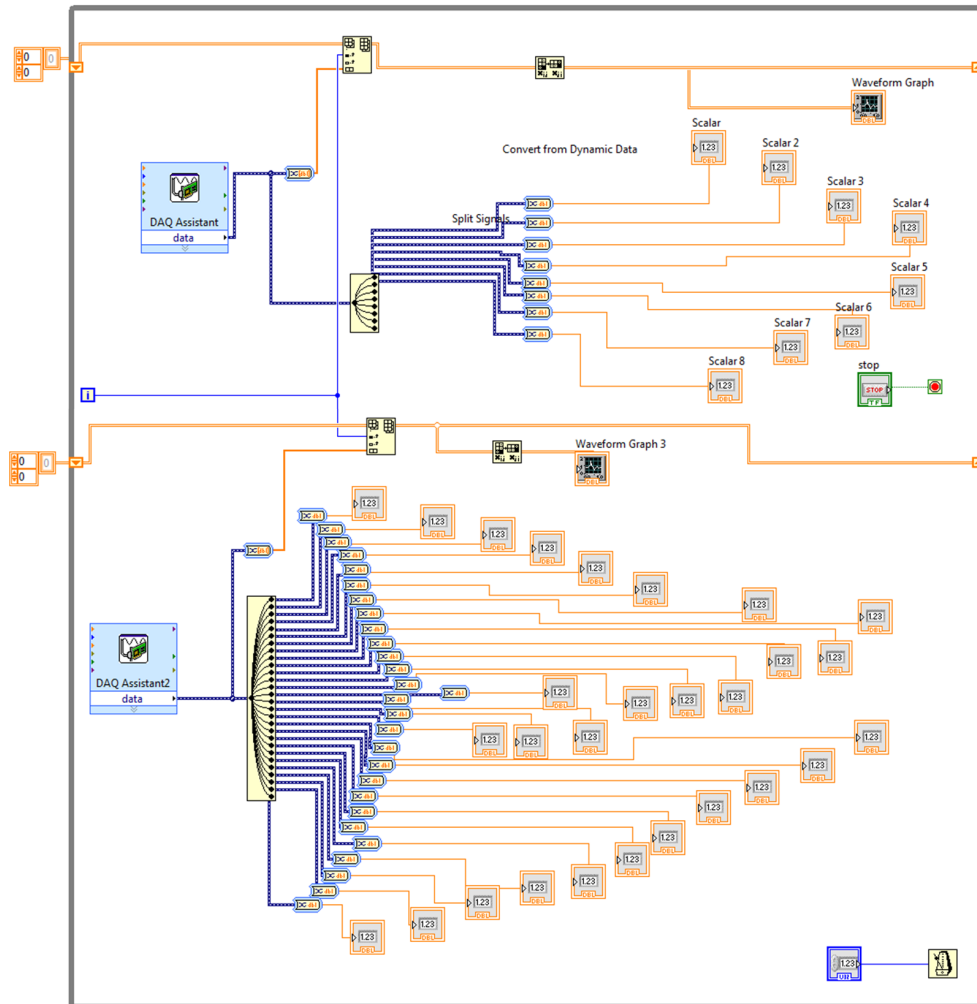


Figura 3.26: Diagrama de bloque de la adquisición de datos del campo de temperaturas

dos bloques terminal de montaje para PXI, denominados NI TB-4357. Estos bloques terminal son especialmente utilizados para medir temperatura de mucho tipos de termopares (Tipo J, K, T, entre otros) y su capacidad máxima de termopares son de 32 cada uno.

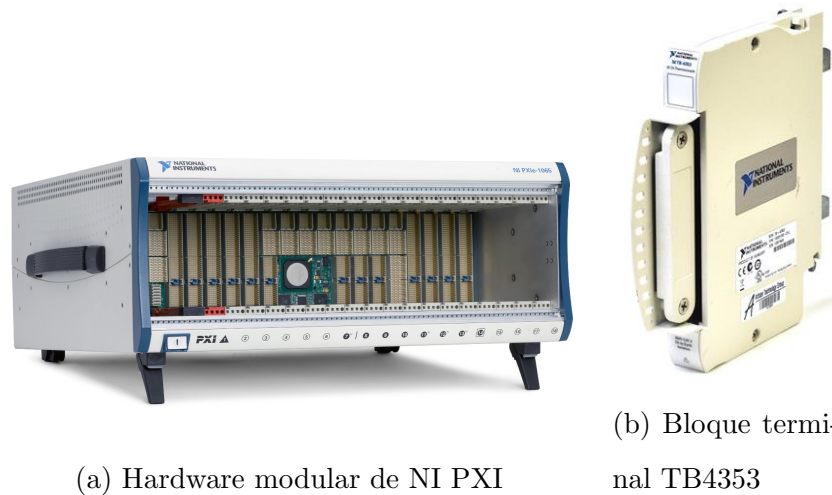


Figura 3.27: Hardware de NI utilizado en la adquisición de datos

Los sensores de temperatura utilizados son los termopares tipo T, este tipo de termopares son usados por su excelente desempeño para la instrumentación a baja temperatura. La composición de los elementos de un termopar tipo T consta de una aleación de Níquel-Cromo y otra de Níquel-Aluminio-Magnesio-Silicio. Los elementos que componen un termopar tipo T son: elemento positivo, cobre 100 % y elemento negativo, 55 % Cobre-45 % Níquel (Constantán). El tiempo para adquisición de datos es de 1 segundo.



Figura 3.28: Termopar tipo "T"

3.3.5 PRUEBAS PRELIMINARES PARA PUESTA A PUNTO DEL BANCO DE PRUEBAS

3.3.5.1 PRUEBA DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN

Una vez instalado el sistema de refrigeración en el banco de pruebas, es necesario realizar una evaluación para asegurar que toda la tubería sea a prueba de fugas. Para lograrlo, fue cargado el sistema con gas cuya presión alcanzó 70 psi, esta presión debe mantenerse constante durante 1 hora para asegurar que el gas se mantenga dentro de la tubería. Después de verificar que no existan fugas dentro del sistema, se realizó la carga de refrigerante, para lo cual es necesario una báscula, controlando así la cantidad en gramos de refrigerante introducido al sistema.

La cantidad óptima para carga fue de 80 g de R134a (el cual es el refrigerante

para el que fue diseñado el compresor) pues esta cantidad fue la que mejor se comportó para el recinto que fue refrigerado y debido a las condiciones de temperatura que alcanzó. En la Fig. 3.29 se puede observar cómo la salida de la válvula de expansión se encuentra escarchada, lo que aseguró que el sistema estaba funcionando correctamente y que este tipo de válvulas de expansión no convencionales para estas aplicaciones, logran expandir el refrigerante líquido, cumpliendo así con la función de este componente satisfactoriamente.

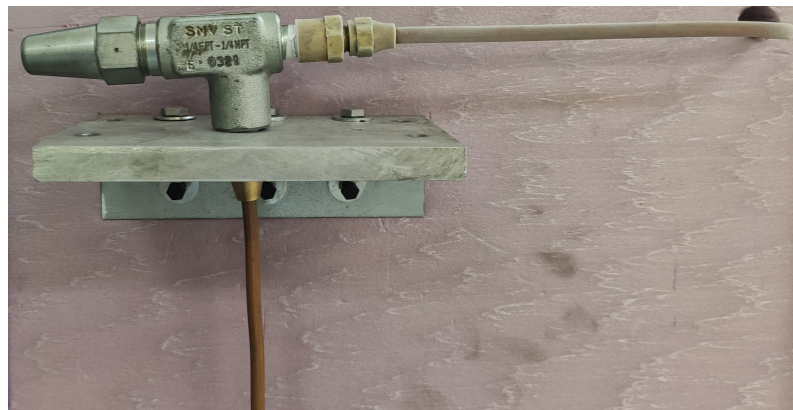


Figura 3.29: Válvula de expansión en funcionamiento

También en la Fig. 3.30 se observa, una vez más, una parte del evaporador escarchado, lo que nos indica que el refrigerante en estado gaseoso está absorbiendo calor como se esperaba dentro del evaporador. Con este procedimiento y observación, se concluye que el sistema de refrigeración está listo para ser utilizado en el banco de pruebas, sin embargo es necesario realizar otras pruebas antes de poder realizar la prueba experimental.



Figura 3.30: Evaporador en funcionamiento

3.3.5.2 PRUEBA DEL TERMOSTATO

Un elemento importante en el sistema es el termostato, cuya principal función es controlar la temperatura interna del recinto aislante. Una vez que se probó la funcionalidad del sistema de refrigeración, es necesario el monitoreo y control de la temperatura del recinto, para comprobar a qué temperatura está llegando la zona en la que se requiere una estabilización a 5°C que será la fuente de calor controlada por convección. Para lo cual fue necesario la colocación de termopares en diferentes partes de la caja, como se puede ver en la Fig. 3.31 donde los números representan el número de termopar posicionado.

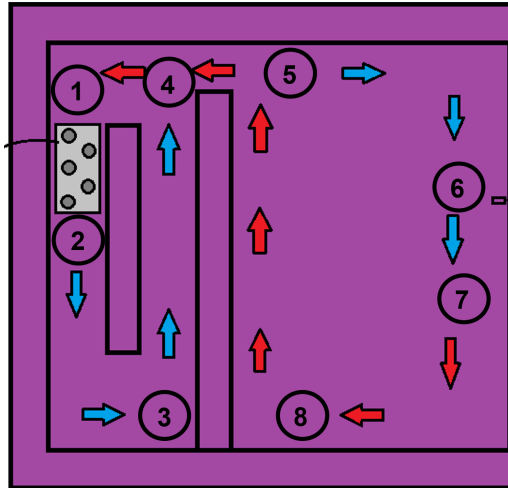


Figura 3.31: Termopares para monitoreo de temperatura

Con la ayuda de estos termopares, se facilitará el monitoreo de la temperatura en puntos clave del banco experimental, no sólo para las pruebas preliminares sino también para las pruebas finales. En la Fig. 3.32 se observa cómo se monitorearon estas temperaturas con la ayuda de la adquisición de datos por medio de un código de LabView.

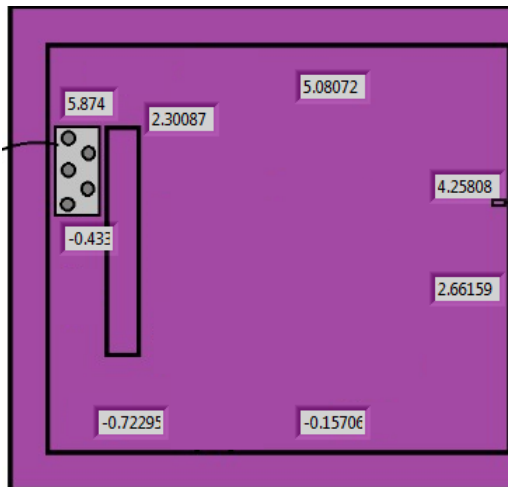


Figura 3.32: Monitoreo del banco de pruebas en LabView

Dentro del programa del termostato, que sólo será utilizado para apagar y encender el compresor como control de la temperatura, pueden modificarse algunos

parámetros de control, los cuales fueron necesarios para lograr un correcto funcionamiento. Los parámetros modificados se muestran en la Tabla 3.8, todos los demás parámetros se mantuvieron predeterminados.

Parámetro	Magnitud	Unidad
Punto de ajuste	4.5	°C
Diferencial	0.1	°C
Lím. mín. del punto de ajuste	-35	°C
Lím. Máx. del punto de ajuste	25	°C
Tiempo mín. act. compresor	0	min

Tabla 3.8: Parámetros adicionales del termostato.

En la Fig. 3.33 se muestra el resultado del control de la temperatura, donde la diferencia máxima está registrada dentro de un rango de $\pm 1^\circ\text{C}$, después de un tiempo de prueba de 2 horas, con el cual podemos determinar que el sistema de refrigeración instalado dentro del banco de pruebas se encuentra completado.

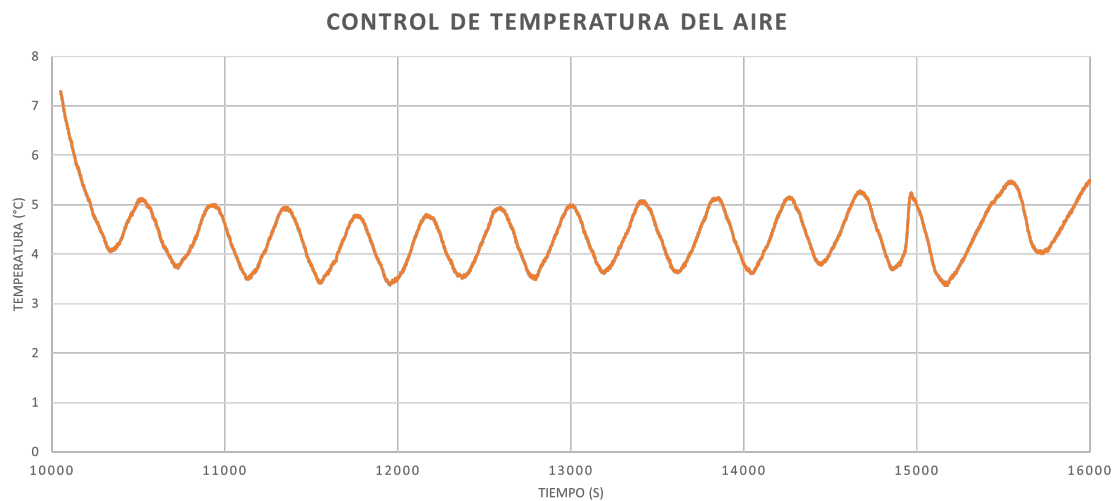


Figura 3.33: Prueba de temperatura del termostato

3.3.5.3 CALIBRACIÓN DE TERMOPARES

Cuando se van a realizar mediciones de temperatura con la ayuda de sensores de temperatura como son los termopares, es muy importante asegurar que las mediciones sean correctas y precisas, debido a que los cálculos posteriores realizados con estas temperaturas pueden verse afectados, por lo que una calibración correcta de los termopares es esencial para lograr resultados confiables.

Para realizar la calibración, es necesario tener un dispositivo que provea la confiabilidad de mantener un dominio de fluido a una temperatura constante. Un baño térmico de recirculación de 15 L, ver Fig. 3.34, fue utilizado para calibrar los termopares. Debido a que el rango de temperatura de medición del campo de temperatura es de -20°C a 0°C , se programó la calibración para el rango de -25°C a 5°C , con un decremento de 5°C entre cada sección de la calibración.



Figura 3.34: Baño térmico de recirculación PP15R-40-AA1B

Los termopares fueron puestos de manera que estuvieran todos en un mismo

plano para su correcta medición en el fluido del baño de recirculación. Como se ve en la Fig. 3.35, los termopares fueron instalados cubiertos por una tapa del mismo dispositivo, comenzando la calibración desde -25°C . Estos termopares se conectaron a la tarjeta bloque terminal TB 4353, a su vez al PXI.



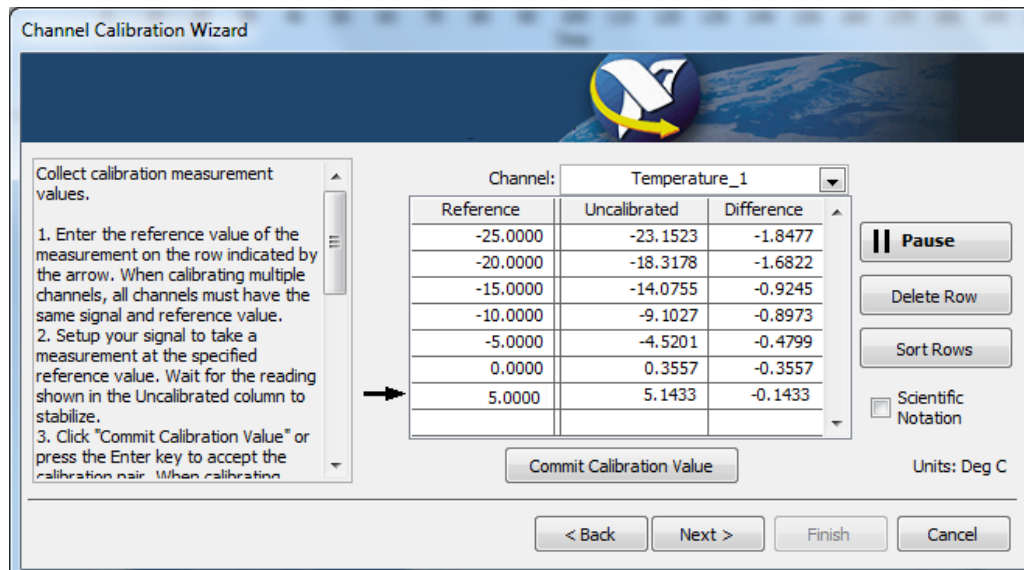
(a) Instalación de los termopares para calibración



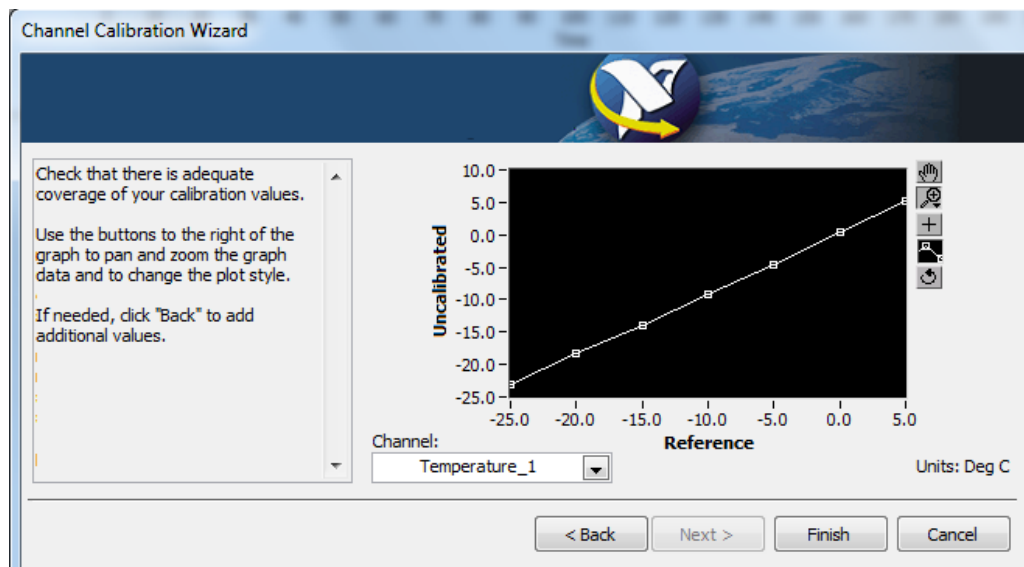
(b) Baño térmico en calibración de termopres

Figura 3.35: Calibración de termopares tipo T en baño de recirculación térmico

Con la ayuda del software Labview y el asistente de adquisición de datos fue posible la calibración de todos los termopares que se utilizaron. Como se mencionó anteriormente, cada diferencia de 5°C se iban tomando la diferencia que existe entre la medición natural del termopar y la temperatura real mostrada por el baño térmico. Posteriormente, después de tomar las temperaturas correspondientes, automáticamente se obtienen pendientes con la relación entre la medida sin calibrar y la de referencia, obteniendo una ecuación de calibración para cada termopar aplicada listo para la prueba de obtención del campo de temperaturas. En la Fig. 3.36 se pueden observar los pasos descritos de la calibración.



(a) Valor de referencia de las mediciones



(b) Pendiente obtenida de calibración

Figura 3.36: Calibración de termopares tipo T

La Fig. 3.37 muestra cómo se ven los termopares que fueron calibrados.

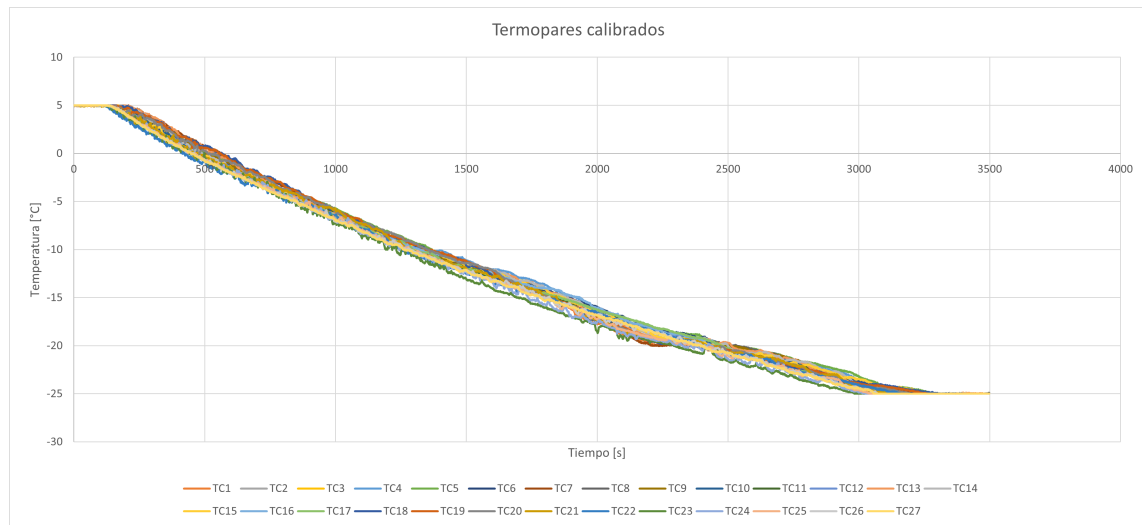


Figura 3.37: Gráfica de 5°C a -25°C de los termopares calibrados

3.3.6 PRUEBA DE FUSIÓN

Obtener la fracción líquida en el fenómeno de cambio de fase, es un resultado obligatorio cuando se desee estudiar los PCMs, por lo que una buena metodología es imprescindible en un estudio como éste.

Se utilizó una cámara CANON DS126431, con un lente de aumento EFS 18-58 mm, instalada en un trípode con nivel para asegurar una correcta sujeción, ajuste y rectitud en la toma de fotografías para capturar el avance del frente de fusión de la prueba del PCM. También un aspecto importante es que la posición donde está la cavidad debe permanecer a nivel, junto con la cámara. Esto nos permite que la captura del experimento se obtenga con la mejor calidad.



(a) Cámara fotográfica CANON



(b) Lente utilizado para la toma de imagen

Figura 3.38: Cámara fotográfica y lente de aumento para cámara CANON.

Se utilizó también una lámpara LED con capacidad de 2000 lm posicionada para contrastar al otro lado lateral de la cámara fotográfica, para iluminar y capturar más claramente el frente de fusión. Una vez que la instalación de adquisición de imagen está listo, es posible comenzar una prueba para validar la obtención del frente de fusión. Puesta en marcha la experimentación, se tomó una fotografía del frente de fusión de la cavidad a 180 min de empezar la prueba, como se puede ver en la Fig. 3.39

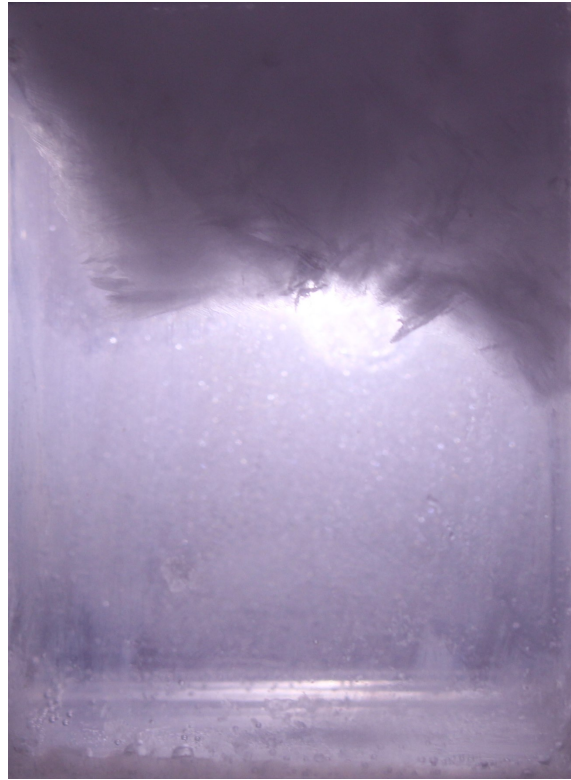


Figura 3.39: Fotografía del frente de fusión a 180 minutos.

Después, por medio del toolbox de Procesamiento de Imagen de Matlab ©, la imagen se analiza y procesa para obtener una binarización del frente de fusión donde el color blanco de la imagen representa el PCM en estado líquido, y el color negro representa el estado sólido. Se obtiene la cantidad de píxeles blancos, en comparación con lo píxeles totales de la imagen binarizada por medio de un código de Matlab para obtener la fracción líquida real de la imagen, siguiendo la metodología de Shokouhmand et. al. [65], la cual arrojó un resultado de fracción líquida igual a 0.6139. El resultado se puede ver en la Fig. 3.40.



Figura 3.40: Imagen binarizada de la captura del frente de fusión

3.3.7 MEDICIÓN DEL CAMPO DE TEMPERATURAS

Una vez realizada la prueba de fusión, para ver el comportamiento del PCM y la calibración de los termopares, es viable poder realizar la prueba de obtención de campo de temperatura mientras el PCM cambia de estado sólido a líquido. Bajo las mismas condiciones iniciales que la prueba de fusión, se instalaron 32 termopares tipo T en la cavidad según la distribución mostrada en la Fig. 3.41.

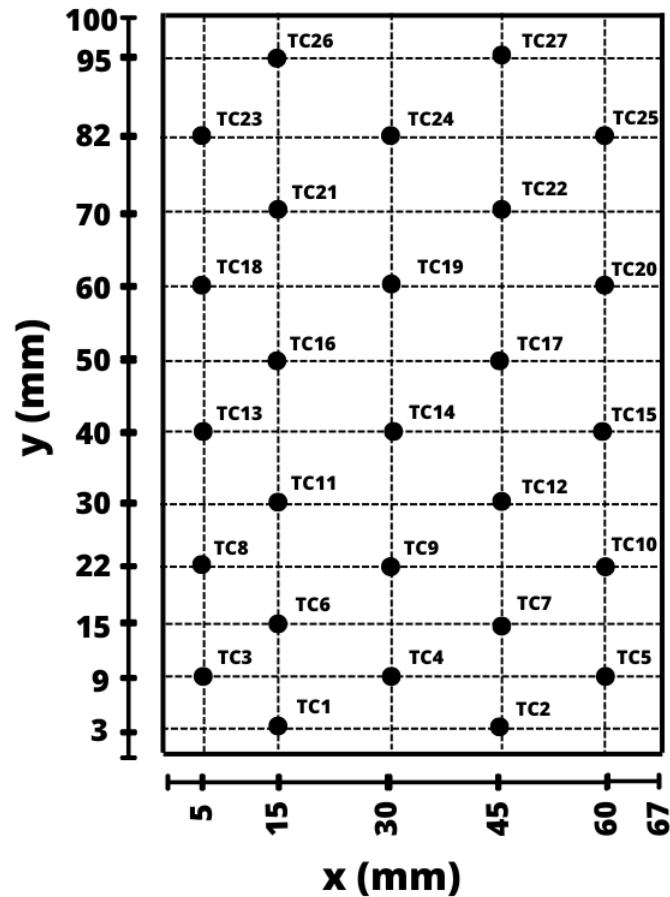


Figura 3.41: Distribución de los termopares para la obtención del campo de temperatura

Esta distribución nos ayuda a obtener una buena adquisición del campo de temperatura mientras está cambiando de fase el material. Todos estos termopares fueron posicionados dentro de la cavidad. Una vez más, un código de LabView fue desarrollado para dicha adquisición y su posterior monitoreo a lo largo de la prueba. En la Fig. 3.26 se puede observar el programa hecho para la adquisición de datos de los sensores.

3.3.8 APLICACIÓN DE LA VELOCIMETRÍA POR IMÁGENES DE PARTÍCULAS (PIV)

Una vez teniendo el banco experimental funcionando y después de haber realizado las pruebas preliminares, se realizó el acoplamiento de este banco experimental con la técnica óptica láser PIV, en donde fue necesario primero realizar un modelo para evaluar como puede ser su instalación. En la Fig. 3.42 se puede ver el modelo planeado para la medición del campo de velocidades de las pruebas experimentales, donde fue necesario la instalación de un sistema de posicionamiento, desarrollado por Dantec Dynamics, que permitió colocar el láser y desplazarlo libremente en el punto requerido. Dicho sistema de posicionamiento tiene la capacidad para desplazar cualquier objeto instalado por hasta 1 metro cúbico (1 metro en cada eje: x , y & z).

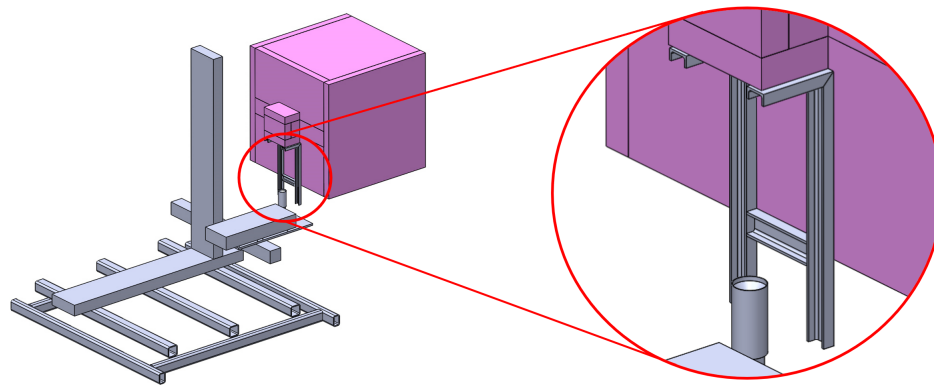


Figura 3.42: Modelo para acoplamiento de Técnica PIV con banco experimental.

Para realizar la calibración del láser, se procedió a instalar el sistema óptico de adquisición de imagen, con una cámara Hisense MkII con un lente AF Micro NIKKOR 60mm f/2.8D y una configuración del mismo en una apertura focal de 16 y zoom al máximo enfocado en el haz de láser que pasa en medio de la cavidad. En la Fig. 4.15 se muestra una obtención del campo de velocidades después de la calibración de la técnica. La sustancia para la calibración fue agua con partículas de Poliamida de $10\mu m$ como partículas trazadoras.

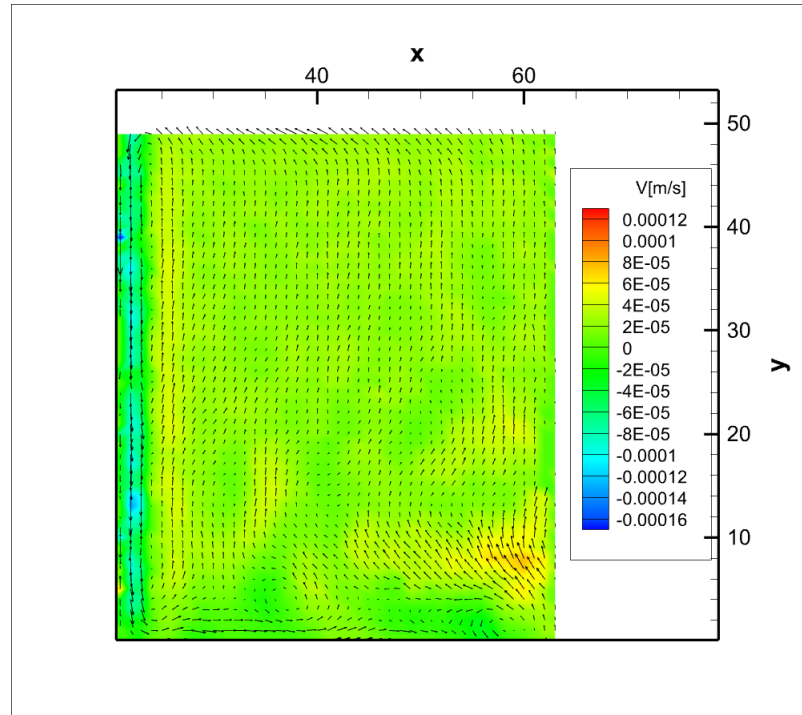


Figura 3.43: Campo de velocidades para calibrar mediciones.

El láser utilizado fue fabricado por Litron Laser, cuya versión es Nano L 200-15 PIV, cuyas propiedades se encuentran listadas en la Tabla 3.9. La fuente de poder utilizada es el modelo LP4550 operando a 127V a frecuencias de 50/60Hz con una corriente máxima de 10A. El láser operó a una potencia media (6.0 puntos del controlador de energía del láser) y con una tasa de frecuencia de 11Hz. Para el PCM de agua con EG, las partículas trazadoras utilizadas fueron las Partículas de Poliamida (PSP) de $10 \mu\text{m}$ de diámetro y para el PCM de agua con NaCl fueron las Esferas de Vidrio Huecas (HGS) de $20 \mu\text{m}$ de diámetro, con una densidad de $1030 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ y $1100 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ respectivamente. Ambas partículas operaron muy bien para trazar los campos del fluido gracias a que la densidad de cada partícula se asemejaba a la densidad del PCM en cuestión.

Parámetro	Magnitud
Tasa de repetición	0-15Hz
Energía salida máxima	12mJ
Duración de pulso	4ns
Longitud de onda interna	1060nm
Longitud onda de salida	532nm

Tabla 3.9: Parámetros y características del láser Nano L 200-15 PIV.

Por último, en la Tabla 3.10 se muestran los parámetros utilizados para el análisis de la obtención del campo de velocidades. El software y la versión para el procesamiento de datos es DynamicStudio ver. 3.20.89. La instalación final se puede observar en la Fig. 3.44.

Parámetro	Descripción
Método de solución	Adaptative Correlation
Ventana de interrogación	32 X 32 Pixeles
Ventana de búsqueda	64 X 64 Pixeles
Tamaño de malla	16 Pixeles
Superposición	50 %

Tabla 3.10: Parámetros considerados en el análisis PIV introducidos en el software DynamicStudio.



(a) Instalación de cámara HiSense.

(b) Instalación láser PIV con traves.

Figura 3.44: Acoplamiento técnica láser PIV con banco de pruebas experimental.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se presentan los resultados adquiridos más relevantes de la investigación, la cual comienza con los datos obtenidos de la simulación numérica. Primeramente se empieza con una discusión del avance del frente de fusión de las tres sustancias y analizamos las diferencias de la rapidez de fusión de los tres PCMs. Posteriormente, evaluamos la transferencia de calor y el campo de velocidades que tiene cada una de las sustancias en donde comparamos el número de Nusselt promedio y la magnitud de la velocidad, haciendo hincapié en la importancia que toma el campo de velocidades en la prueba de fusión.

También, se presentan los resultados obtenidos de las pruebas experimentales, en donde se sometieron a prueba dos PCMs, ya que la metodología experimental se centró en comparar el cambio de fase entre la mezcla de agua con EG y la salmuera. Se comenzó con la obtención del frente de fusión de ambos materiales y se describió el procedimiento por medio del cual se calculó la fracción líquida de las fotografías tomadas del frente de fusión. Después se analizó la transferencia de calor, comparando parámetros y números adimensionales para caracterizar el desempeño térmico en la prueba de fusión con la ayuda de la adquisición del campo de temperaturas. Por último, se empleó la técnica PIV con la cual se pudieron extraer los patrones de flujo en cada sustancia dando lugar a una discusión que encabezó la diferencia entre ambos campos de velocidades obtenidos.

4.1 SIMULACIÓN COMPUTACIONAL

4.1.1 FRENTE DE FUSIÓN

Observando la simulación del proceso de fusión, se pueden apreciar algunos patrones dominantes en el campo de fluido gracias a los diferentes mecanismos de flujo que existen. La Fig. 4.1 muestra el frente de fusión en diferentes tiempos para los tres PCMs, agua con EG al 33%, agua con PG al 36% y agua con NaCl al 21%. Conforme el frente de fusión va avanzando, la línea de interfase de fusión tiene un comportamiento bastante interesante debido a los efectos de convección hidrodinámica. Vemos como en los primeros tiempos de fusión, la interfase se mantiene prácticamente paralela a la pared caliente, lo que nos habla de un comportamiento característico de la transferencia de calor por difusión, mientras que en los minutos después, una vez que existe un campo de fluido moviéndose, éste comienza a generar una recirculación en la zona superior, lo que permite rápidamente la transferencia de calor entre la pared caliente y la superficie fría.

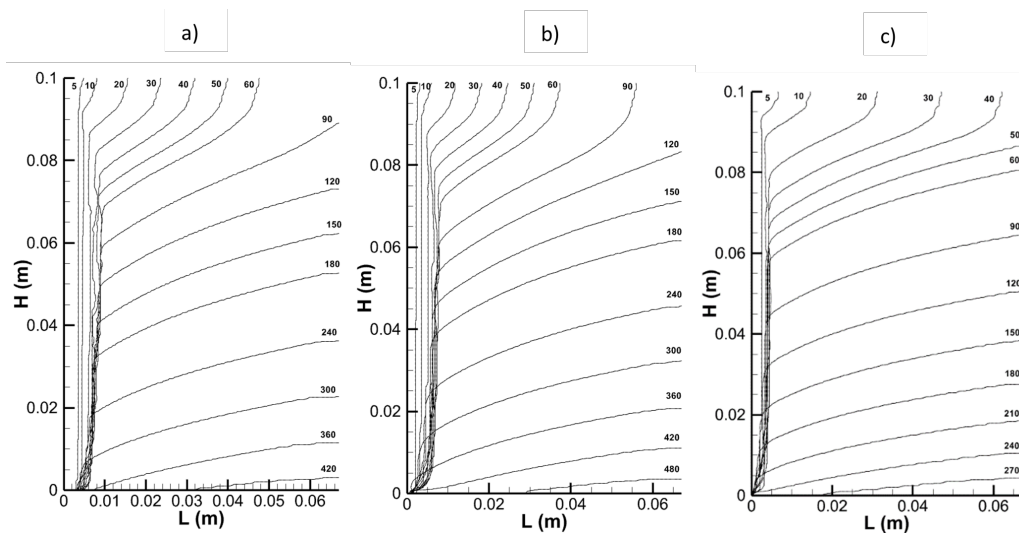


Figura 4.1: Avance del frente de fusión de los PCMs indicado en minutos. EG (a), PG (b) y NaCl (c).

Así, mientras la pared isotérmica siga a una temperatura superior que el PCM, el gradiente de temperatura horizontal permite la transferencia de calor hacia la zona sólida. Conforme la temperatura del PCM que está en contacto con la pared caliente alcanza el punto de fusión, el material empezará a cambiar de fase, una pequeña capa de líquido de PCM comienza a formarse frente a la pared caliente hasta alcanzar la forma tan característica de estos procesos de fusión, como en la Fig. 2.6.

En la Fig. 4.2 observamos los tres perfiles de fracción líquida, que es la cantidad de PCM que está en estado líquido en la cavidad, contra el tiempo total de fusión, en donde podemos observar claramente como la solución que más tiempo tarda en cambiar completamente de fase es el agua con PG, tardándose 8.47 horas aproximadamente, a su vez, el que le sigue no por mucha diferencia es la mezcla de agua con EG, tardándose cerca de 7.5 horas, y por último, la solución que menos tiempo demoró en fundirse es el agua con NaCl, tardándose tan sólo 4.9 horas, 42 % más rápido que el agua con PG. Uno de los atributos que podemos observar ante dicha rapidez de la salmuera es su alta conductividad térmica y baja viscosidad en comparación con las otras sustancias, lo cual nos conduce a un número de Prandtl 570 % y 148 % menor a el caso con EG y PG, respectivamente, indicándonos que la difusión térmica es más dominante que la difusión viscosa, lo que contribuye también a fuerzas de flotación más intensas, dando lugar a la rapidez de fusión mayor de la salmuera.

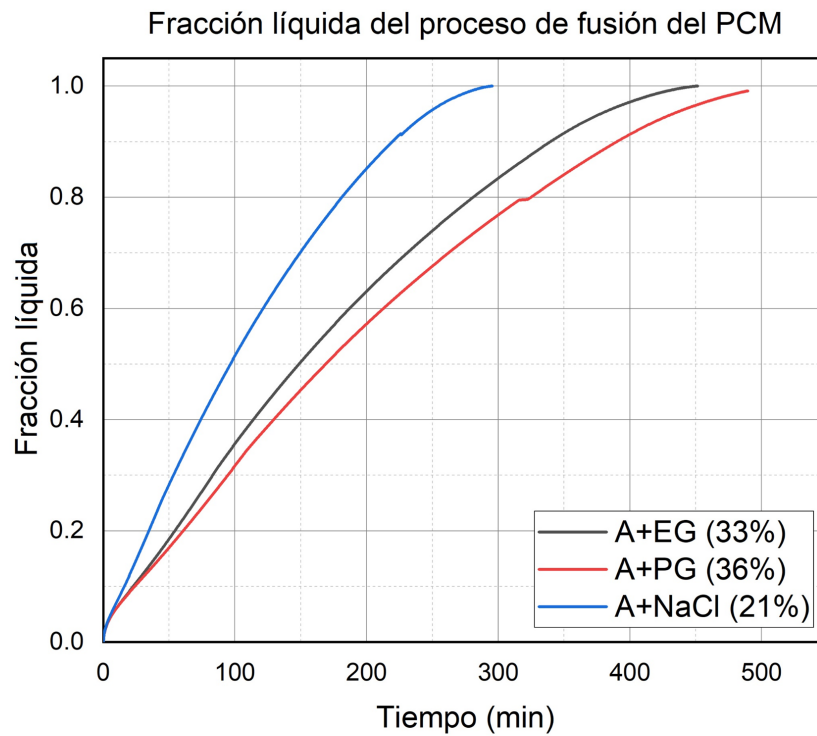


Figura 4.2: Comparación de la fracción líquida de los tres PCMs.

4.1.2 TRANSFERENCIA DE CALOR

Los resultados del campo de temperatura son mostrados en la Fig. 4.3, el cual fue obtenido con la ayuda del software Tecplot para post-procesamiento de la simulación. En la Fig. 4.3(a)-(c) se muestra la solución de agua con EG, en la Fig. 4.3(d)-(f) la solución de agua con PG y en la Fig. 4.3(g)-(i) la solución de agua con NaCl en tres diferentes tiempos de la simulación. La primera fila 30 minutos, la segunda fila 2 horas y la última fila 4 horas. En la Fig. 4.3(a), (d) y (g) podemos apreciar claramente las línea de cambio de fase casi paralela a la pared caliente a lo largo de casi toda la altura, excepto en la parte superior, donde la difusión de calor comienza a penetrar en la dicha parte de la cavidad, debido al flujo de la convección natural del PCM.

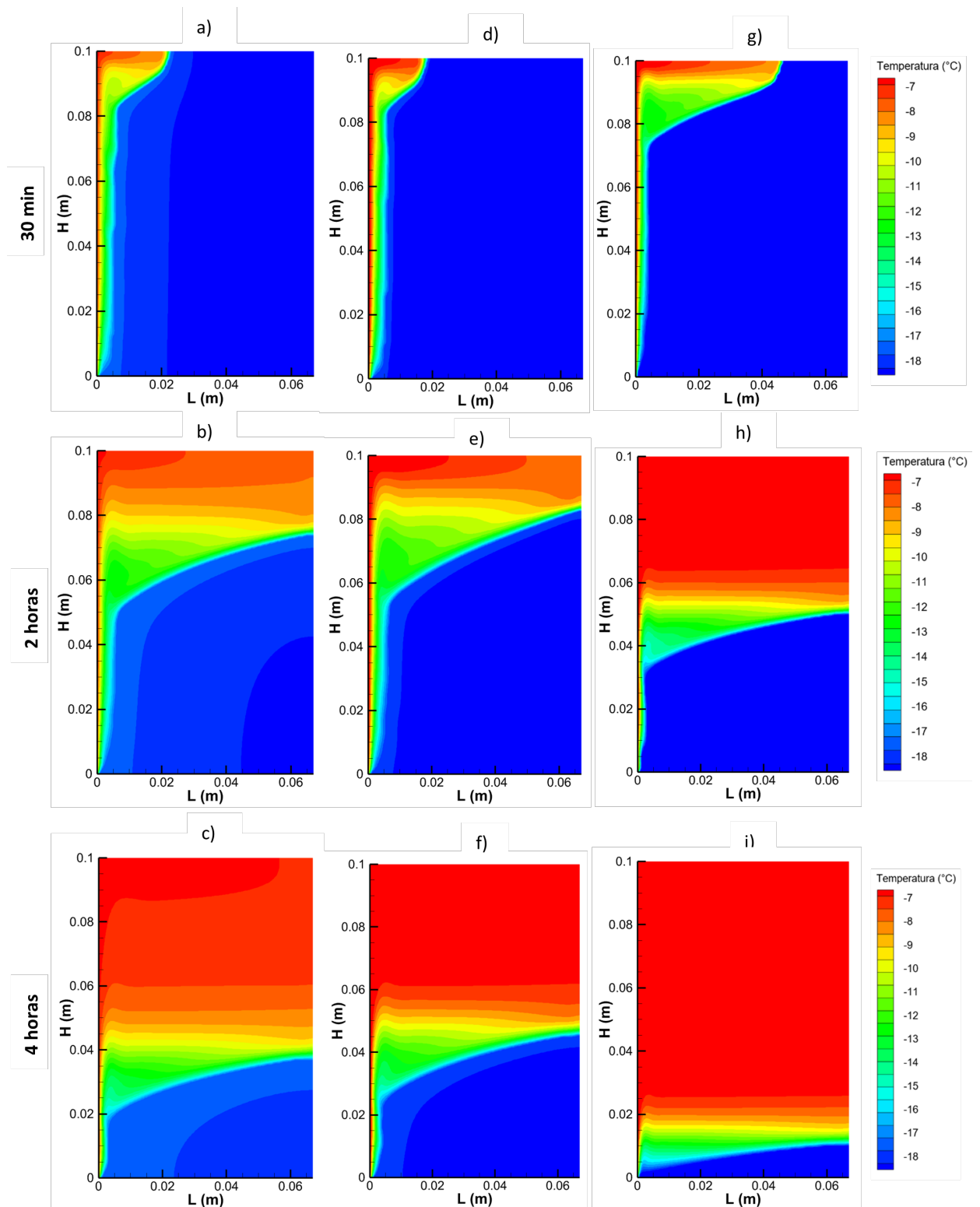


Figura 4.3: Contornos de temperatura de la cavidad con PCM, (a)-(c) agua con EG al 33 %, (d)-(e) agua con PG 36 % y (g)-(i) agua con NaCl al 21 %.

A partir de las dos horas, éste efecto se vuelve mucho más intenso conforme el proceso avanza, en donde comienzan a verse cómo las fuerzas de flotación superan la resistencia viscosa, propagándose paulatinamente hacia la parte baja de la cavidad durante todo el proceso de cambio de fase. Finalmente, en la última línea de la Fig. 4.3, han pasado cuatro horas en cada simulación, la cual claramente se ve como la mezcla de agua con NaCl está a punto de fundirse en su totalidad mientras que las otras dos sustancias aún tiene que pasar más tiempo para alcanzar una fracción líquida de 1. El número de Nusselt es un valor adimensional que representa la intensidad de transferencia de calor por convección natural, fue obtenido utilizando el valor del coeficiente película promedio de la pared caliente el cual se calcula con el post-procesamiento del software ANSYS Fluent, y con la ayuda de la siguiente ecuación:

$$\bar{N}u(t) = \frac{\bar{h}(t)H}{k_l} \quad (4.1)$$

donde H es la altura de la cavidad y k_l es la conductividad térmica promedio del líquido. Por lo cual obtenemos los número de Nusselt promedio a lo largo del proceso de fusión para cada caso. Este resultado es mostrado en la Fig. 4.4, donde se observa el comportamiento de transferencia de calor de las tres sustancias.

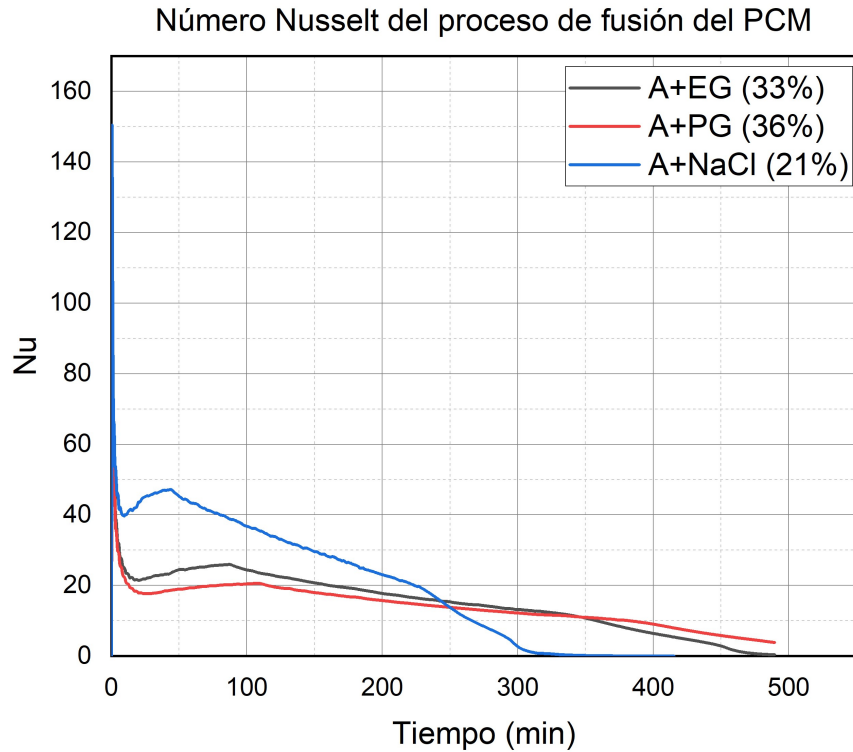


Figura 4.4: Comparación del Nu para los tres PCMs.

En la Fig. 4.4 se observa una vez más cómo la transferencia de calor más intensa la tiene la salmuera, seguida por el agua con EG y después agua con PG. Como se comentará más adelante, en los primeros instantes del proceso de fusión, las gráficas tienen una pendiente descendente bastante notable y característica del proceso, lo que claramente representa una transferencia de calor superior a un Nu de 100 en dichos instantes, comprobando que el primer mecanismo de transferencia de calor es por conducción (pared caliente sólida con PCM en estado sólido).

4.1.3 CAMPO DE VELOCIDADES

La estimación del campo de velocidades es uno de los resultados claves para caracterizar el proceso de fusión para diferentes PCMs. Las tres sustancias muestran un comportamiento bastante similar, solamente con la diferencia de que la sal-

muestra es la que muestra velocidades un poco más elevadas que las otras soluciones, sin haber una diferencia en los patrones de la convección natural. La Fig. 4.5 muestra el campo de velocidades a los 30 minutos de iniciado el proceso para el caso de agua con EG. En la parte superior, se ve que está generando una pequeña recirculación, si bien aún está en una etapa temprana del cambio de fase, más adelante, como lo hemos explicado anteriormente, se genera una corriente que incrementa el transporte de calor hacia la región sólida favoreciendo que ésta se funda, generando una piscina con poca profundidad [5].

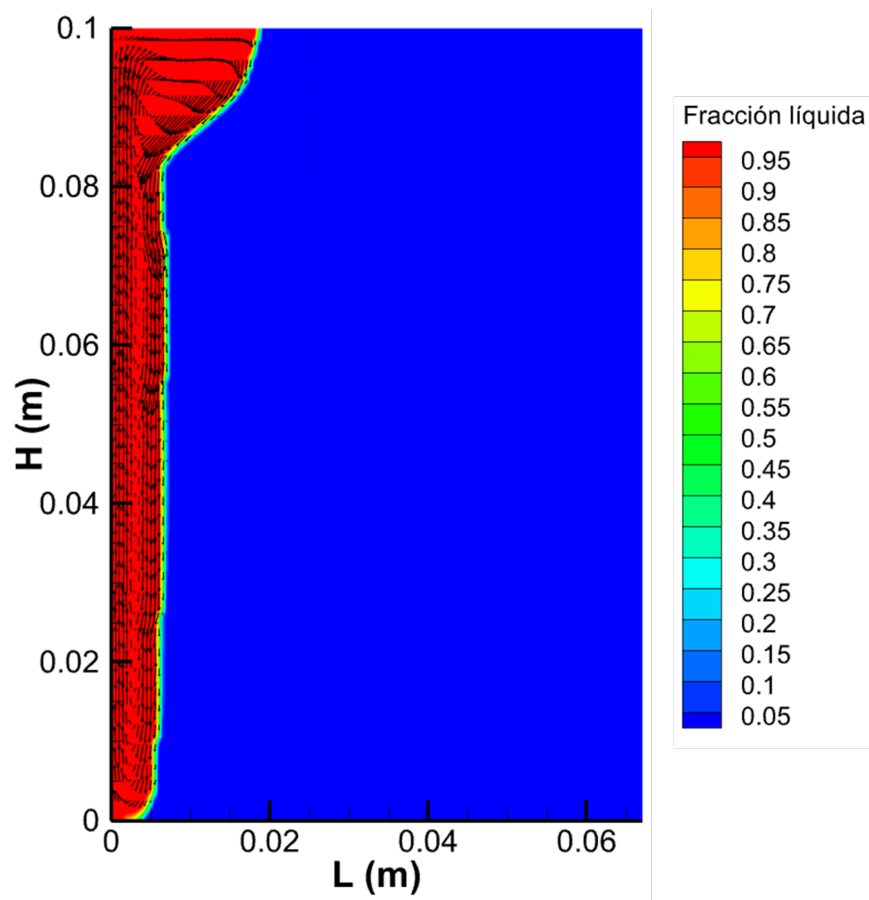


Figura 4.5: Vectores de velocidad y fracción líquida para el caso de agua con EG a los 30 minutos.

En la Fig. 4.6 podemos observar cómo varía la magnitud de la velocidad promedio del caso de agua con EG con respecto a la fracción del tiempo de fusión total,

donde se cuantifica el tiempo del proceso de fusión de 0 a 1 (0 = Inicio del proceso de fusión; 1 = Fin del proceso de fusión, i.e. fracción líquida igual a 1). Es importante mencionar y se discutirá después, que en aproximadamente en el 20 % de la fracción de fusión total, se encuentra la velocidad de convección natural máxima, lo que a su vez permite que la intensidad de la transferencia de calor aumente y en esos lapsos de tiempo podamos ver cómo el material se funde mucho más rápido que en cualquier otro instante de tiempo en todo el proceso de fusión. Esto explica el porqué hay un incremento en el número de Nusselt, cuyo aspecto que también ha sido reportado en otras investigaciones sobre el proceso de fusión [29, 34, 65]. Ésta variable se obtuvo directamente del post-procesamiento del software de CFD, en donde fue extraída la velocidad máxima global en cada paso de tiempo de la simulación y graficada como se muestra a continuación.

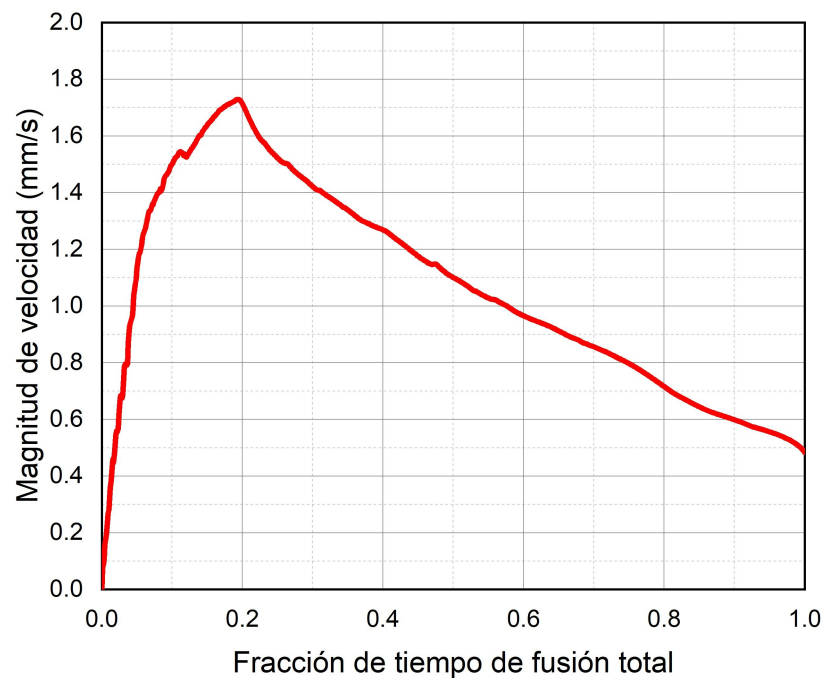


Figura 4.6: Magnitud de la velocidad global en función de la fracción del tiempo total de fusión.

En la Fig. 4.7 se muestra la magnitud de la velocidad para los tres PCMs, bajo el mismo orden explicado anteriormente en la Fig. 4.3. Conforme el proceso de fusión

avanza, se observa cómo en los primeros 30 minutos, el líquido recién fundido (el más cercano a la pared caliente) sube bajo la misma dirección que en la Fig. 4.5. Dicha circulación es explicada de la siguiente manera: dos zonas de fluido aparecen dentro de la cavidad, una es el fluido cercano a la pared caliente, que cuando aumenta su temperatura su densidad disminuye y la otra zona de fluido es más fría ya que está en contacto con el PCM en estado sólido, aumentando su densidad, generando dicha circulación.

Esta diferencia de densidades es la principal causa del patrón de recirculación producido en el campo de fluido (en sentido de las manecillas del reloj), generado por dicha diferencia de temperaturas entre la pared caliente y el PCM en estado sólido. Gracias a esto, el proceso de fusión (material sólido admitiendo calor) opera de esta forma tan significativa.

A los 30 min. de la simulación vemos que la convección natural es muy intensa, sobre todo en el caso de agua con NaCl, donde se observa que la magnitud de la velocidad no es tan alta para las otras dos sustancias. Después, a las dos horas, sigue existiendo una convección natural pero de una intensidad menor, resaltando que donde se encuentra la interfaz sólido-líquido, ahí se va a desplazar el patrón de flujo, en donde se observa el perfil de velocidad y su magnitud. Finalmente, a las cuatro horas de la prueba numérica, la convección natural se va tornando más débil, lo cual indica que el proceso de fusión está finalizando, principalmente para la salmuera, luego para la mezcla de agua con EG y, por último, la mezcla de agua con PG.

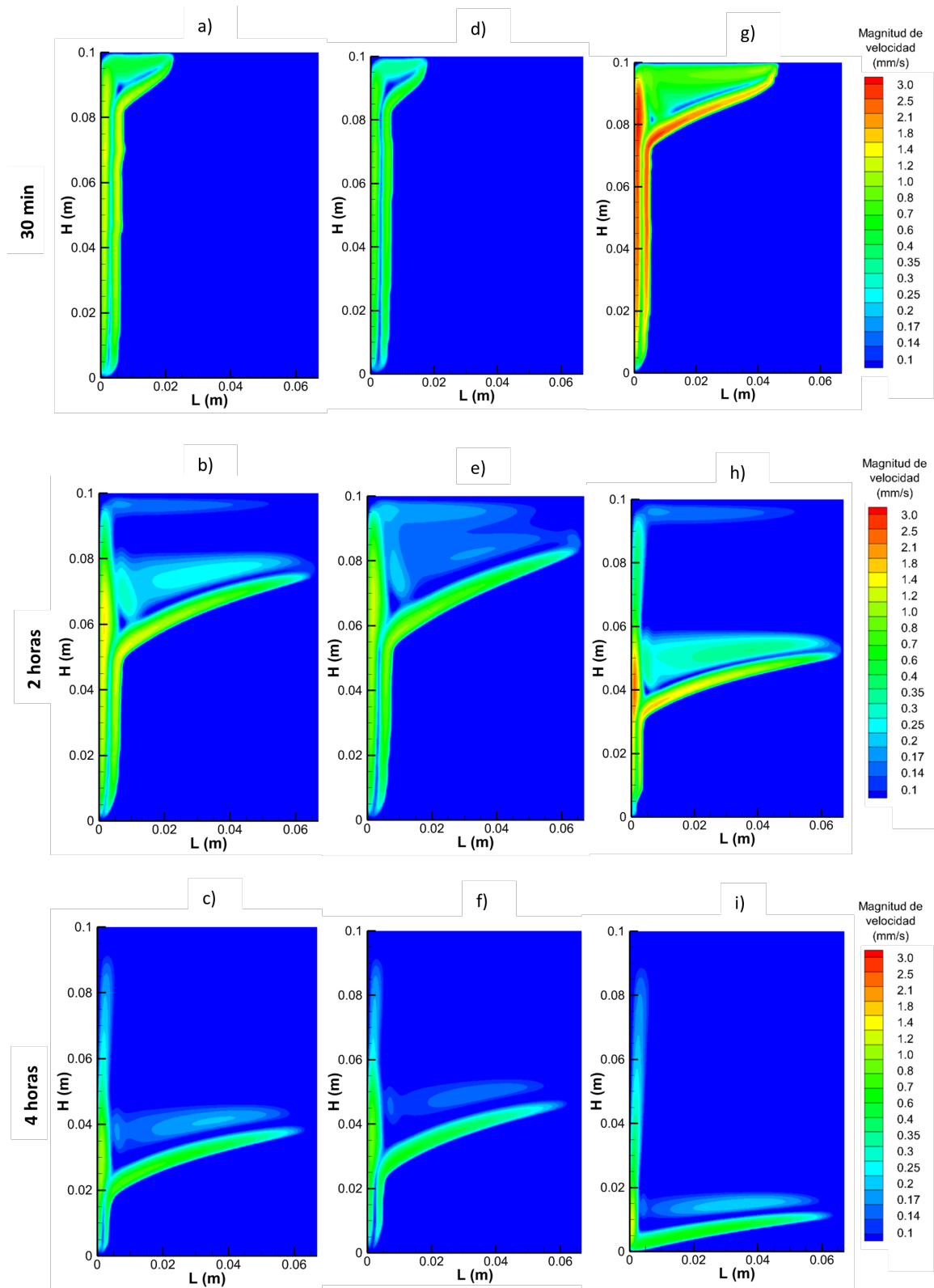


Figura 4.7: Magnitud de la velocidad de la cavidad con PCM, (a)-(c) agua con EG al 33 %, (d)-(f) agua con PG 36 % y (g)-(i) agua con NaCl al 21 %.

4.2 RESULTADOS EXPERIMENTALES

4.2.1 FRENTE DE FUSIÓN

Del proceso de fusión del PCM, se adquirieron imágenes para procesarlas y calcular la fracción líquida. Como se mencionó antes, a lo largo del seguimiento del frente de fusión, se capturaron imágenes en tiempos determinados para observar y analizar el mismo. Entonces, la fracción líquida fue calculada como la razón entre el área líquida y el área total del dominio del PCM, como se describió en la sección 3.3.6. En la Fig. 4.8 se muestra el registro en función del tiempo de la fracción líquida para la solución de agua con cloruro de sodio al 18.8wt %.

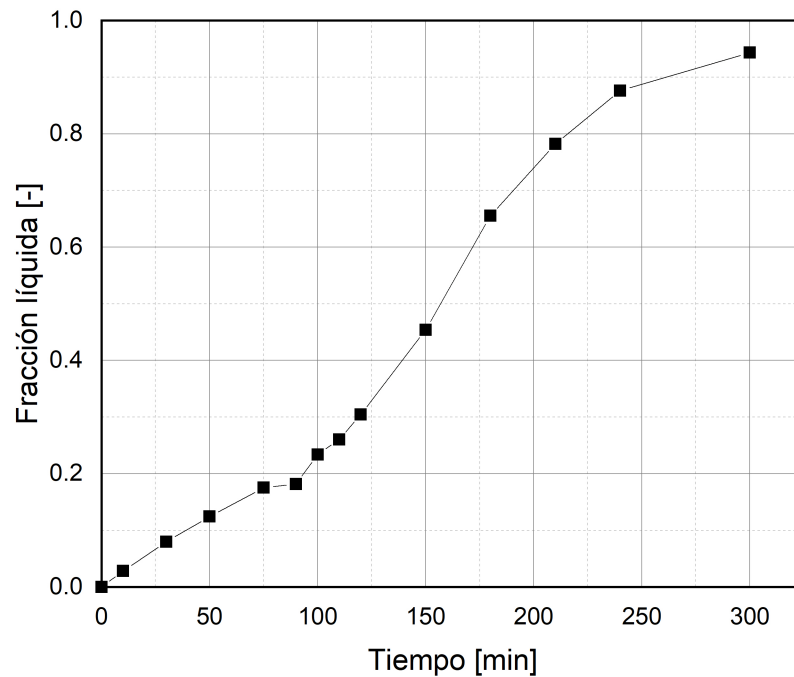


Figura 4.8: Frente de fusión de agua con NaCl al 18.8%wt

Una de las razones por la que se seleccionó la mezcla de agua con NaCl es debido

al resultado que nos arrojó la simulación de dinámica de fluidos computacional, cuyo resultado principal fue el tiempo total de fusión, superando por rapidez de fusión a las otras dos soluciones. Esto nos conduce también a otra razón por la que se seleccionó el agua con NaCl, y es debido a la complejidad de operación del banco experimental acoplado a un sistema de refrigeración, funcionando en condiciones de temperatura de congelación, permitiendo el acortar la duración de la experimentación en tiempos de fusión, que comparado con las otras dos soluciones, esta es la más rápida.

El tiempo total de fusión fue de 330 min aproximadamente. El frente de fusión obtenido comienza verticalmente en los primeros instantes de tiempo, semejante a lo esperado en la simulación y en la literatura, sin embargo, conforme pasa el tiempo, a diferencia de lo observado en la solución numérica propuesta, comienza a cambiar de fase en la parte inferior creando la pequeña piscina de poca profundidad incrementando horizontalmente hasta alcanzar la pared contraria a la fuente de calor. Esta piscina sigue creciendo, erosionando la parte sólida en dirección vertical hasta alcanzar la fusión completa, como se observa más adelante en la Fig. 4.10.

Una de las problemáticas para la captura del frente de fusión en PCMs es la forma en que se captura la imagen, dado que las condiciones del problema principal son que sólo de un lado del modelo haya una fuente de calor y el resto esté completamente aislado. Por lo tanto, es necesario dejar expuesta una cara de la cavidad para que se tome la captura del frente de fusión instantáneo, para lo cual es necesario remover el aislante de esa cara durante 20 segundos. Tomando en cuenta la temperatura ambiente durante la experimentación de 23°C , la temperatura del PCM promedio de -15°C , y un coeficiente de película promedio del aire de $5\text{ W}/\text{m}^2\text{K}$, la pérdida de calor del total de aperturas fue de 381.9 J, lo que en comparación con el calor total absorbido en el proceso de cambio de fase da un porcentaje de 0.38 %.

Mientras en la experimentación la interfase sólida-líquida comienza desde la zona inferior, extendiéndose en la dirección superior, el comportamiento de fusión en el análisis numérico, comienza a cambiar de fase desde la zona superior, hasta avanzar

en dirección inferior a lo largo de la altura de la cavidad. Debido a esto, se decidió continuar el análisis con el principal objetivo de esta investigación, que es el estudio del efecto de la variación de las propiedades termofísicas en el comportamiento de fusión, por lo que se procedió a analizar también el cambio de fase experimental para la solución de agua con EG al 30.5%wt.

En la Fig. 4.9 se muestra la gráfica de avance de fusión de la solución de agua con EG al 30.5wt%. Como se puede observar el tiempo de fusión es muy cercano al doble que en el caso de la solución de agua con NaCl, lo que muestra un comportamiento semejante a la simulación numérica, donde también el tiempo total de fusión de agua con EG es casi el doble a lo que se tardó la solución de agua con NaCl.

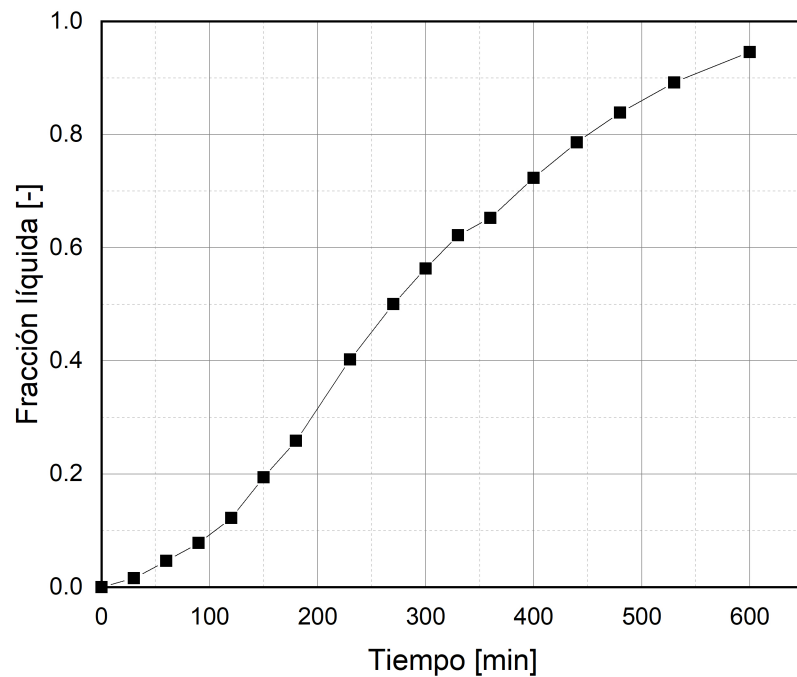


Figura 4.9: Frente de fusión de agua con EG 30.5%wt

En la Fig. 4.10, se muestran los frentes de fusión en tres instantes de tiempo iguales, en donde se puede observar la diferencia de rapidez de fusión que tienen

estas dos soluciones. En los 30 minutos del proceso, la salmuera tiene una fracción líquida de 0.08, mientras en la solución con EG tiene una fracción líquida de 0.015, lo que dicta que la solución salina tiene una mayor rapidez de fusión. Mientras el experimento sigue avanzado, se puede apreciar la diferencia de rapidez de fusión con más claridad, a pesar de que se encuentran en las mismas condiciones de temperatura y ambiente, la diferencia entre sus propiedades termofísicas son el causante de estos comportamientos, las cuales la viscosidad y la conductividad térmica son las más relevantes para el proceso de cambio de fase, como se explicará más adelante.

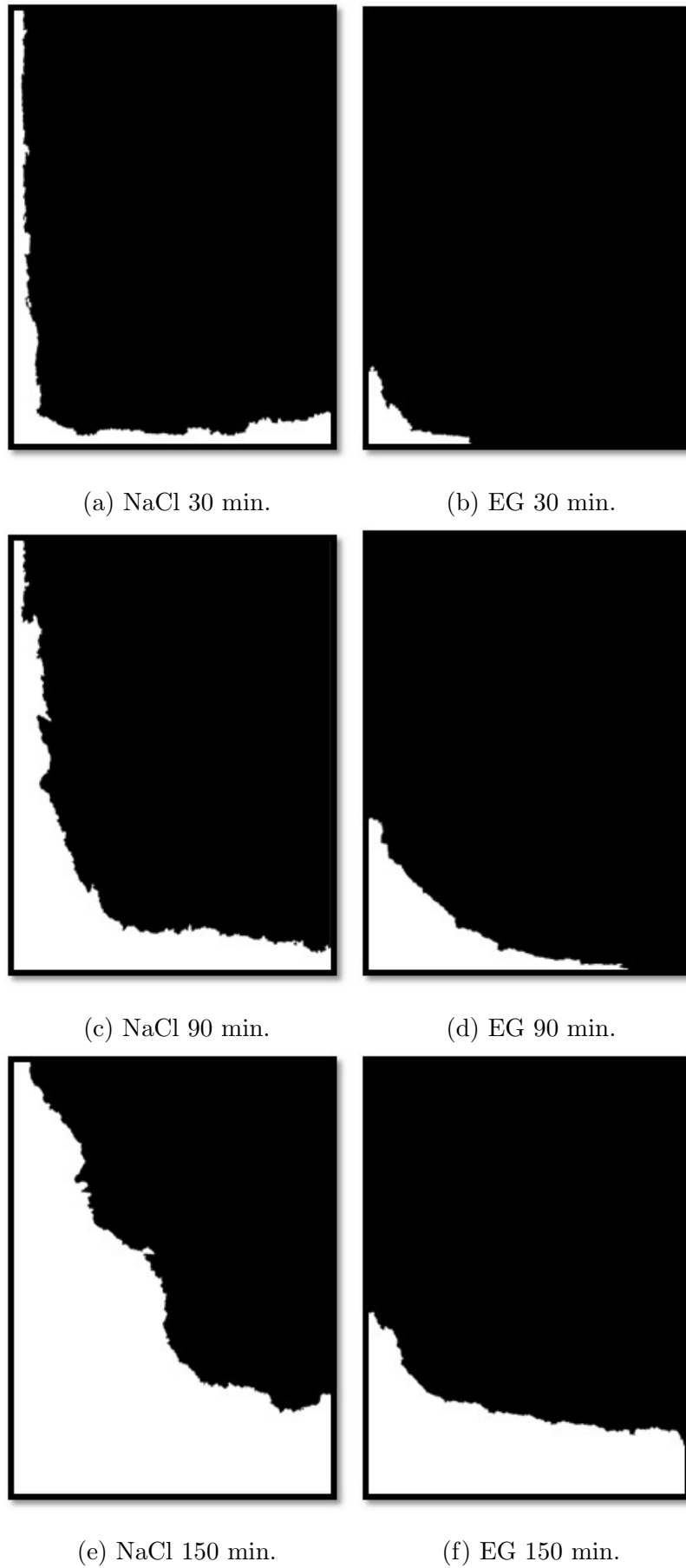


Figura 4.10: Frente de fusión experimental binarizado

Como parte de una observación no vista antes, en ambos casos se muestra el comienzo del proceso de fusión en la zona inferior de la cavidad y se podría comentar que es debido a que ambas sustancias son mezclas de agua que, como bien se conoce, es de las pocas sustancias que presentan una expansión en el volumen cuando se solidifica, lo que significa que la densidad en estado sólido es menor que en estado líquido, explicando porqué el hielo flota.

La condición de la fuente de calor antes mencionada también se demostró en esta experimentación, como se describió, la condición de fuente de calor es por convección natural a 5°C , sin embargo, se supuso en un principio que debido a que la cavidad se encuentra a temperatura promedio de -15°C y a que el ambiente naturalmente lleva humedad, esta se iba a condensar y escarchar en la pared de aluminio. Su temperatura promedio fue de 0°C medida en diferentes puntos de la placa. En la Fig. 4.11 se puede observar la escarcha generada en la placa de aluminio de la cavidad, lo que genera que la fuente de calor sea de una pared isotérmica a 0°C .

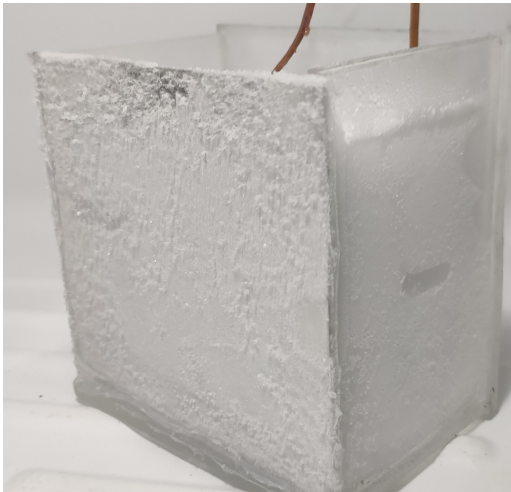


Figura 4.11: Pared de la fuente de calor de la cavidad escarchada

4.2.2 TRANSFERENCIA DE CALOR

Para analizar el efecto que tiene la transferencia de calor en ambas soluciones, fue necesario medir puntualmente las temperaturas instantáneas del proceso de cambio de fase, como lo muestra la Fig. 3.41 en la sección de Metodología, debido a que para obtener el número de Nusselt promedio, es necesario obtener el coeficiente de película promedio, la transferencia de calor por convección instantánea y el calor absorbido por el PCM, el cual éste último necesita la información del campo de temperaturas de la prueba.

Los PCMs, que fueron estudiados en el proceso de fusión, i.e. agua con NaCl y agua con EG, tienen una característica importante llamado almacenamiento de energía. Cuando un material cambia de fase de sólido a líquido, absorbe calor de dos maneras, por medio del calor sensible y del calor latente. Para el calor sensible existen dos tipos de almacenamiento del PCM: uno es el calor sensible en estado sólido (antes de que el material llegue al punto de fusión y se comience a derretirse), y el otro es el calor sensible en estado líquido, que no es más que el sobrecalentamiento del líquido, cuya sustancia continúa absorbiendo calor por medio del aumento de la temperatura hasta alcanzar el equilibrio térmico, en este caso, la temperatura de la pared caliente. El otro tipo de almacenamiento de energía es el calor latente, el cual se mide con un parámetro llamado calor latente de fusión, distribuido en función de la fracción líquida del material, asumiendo que cuando éste cambie completamente de estado sólido a líquido, todo el material ha absorbido energía por medio del calor latente.

Con la ayuda del método descrito por Shokouhmand et. al. [65], se calcularon los datos de los calores absorbidos, las transferencias de calor y el número de Nu promedio. En la Fig. 4.12 se muestra la energía absorbida para el caso de agua con EG obtenida cada segundo, la energía total obtenida fue cerca de 131 KJ. Podemos observar que el calor sensible absorbido equivale a un 17% del calor absorbido total, en donde el calor latente es en comparación 5 veces más que el sensible, y éste es

uno de los principales motivos por el cual los sistemas de almacenamiento de energía por calor latente son de los primeros en ser considerados.

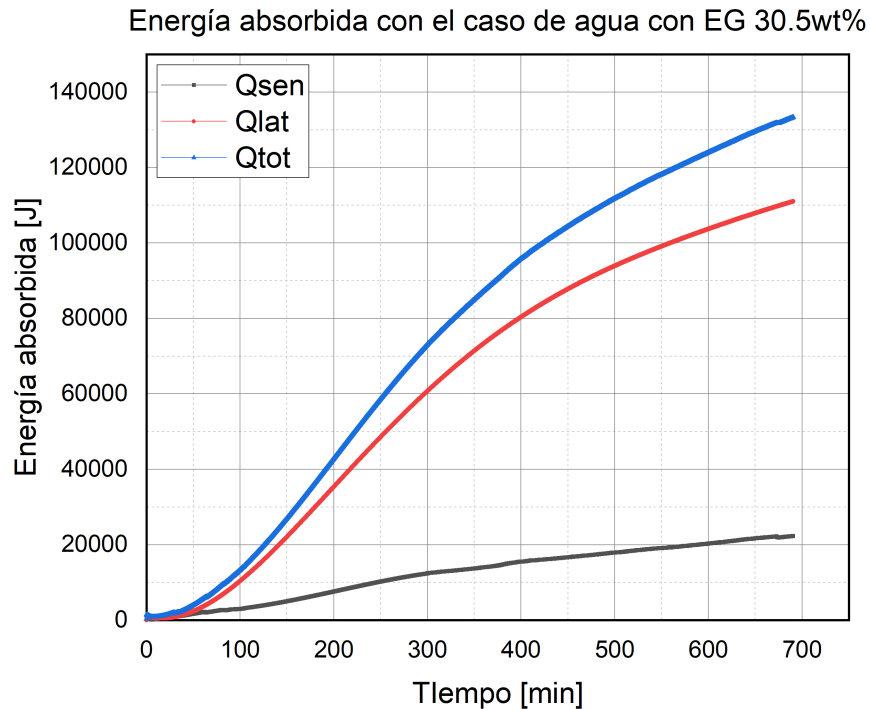


Figura 4.12: Energía total absorbida en el proceso de fusión de la mezcla de agua con EG al 30.5wt %

Para el análisis de almacenamiento de energía de la solución salina mostrada en la Fig. 4.13 se encontró de la misma manera la poca intervención de la parte del calor sensible, aportando a la energía total sólo un 8.5 %, aproximadamente. A pesar de que ahora el calor total es de 120 KJ, 11 KJ menor a la solución con glicol, el tiempo del proceso es casi la mitad, lo que traducido en un sistema almacenamiento de energía mucho más eficiente debido a que toma un menor tiempo para absorber y, por lo tanto, tiene una mayor respuesta térmica a la conservación de energía.

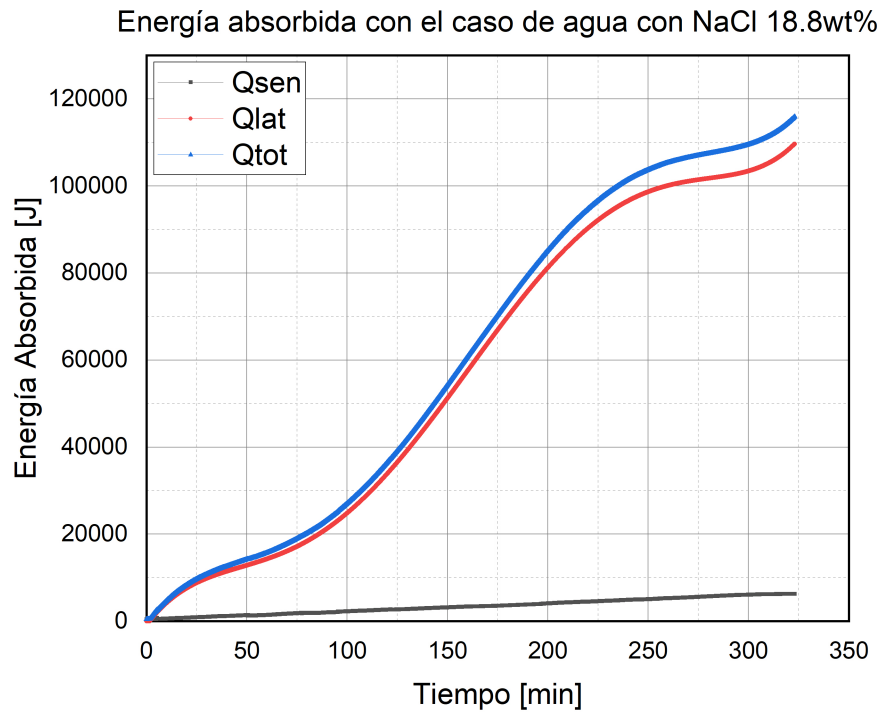


Figura 4.13: Energía total absorbida en el proceso de fusión de la mezcla de agua con NaCl al 18.8wt %

4.2.2.1 COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR

Una vez obtenida la cantidad de calor absorbido en las prueba de cambio de fase, es posible calcular el número de Nu promedio en cada uno de los casos. Primero, obteniendo el coeficiente de tranferencia de calor por convección promedio de la pared caliente, como se muestra a continuación:

$$h(t) = \frac{\dot{Q}_{total}(t)}{A_w(T_w - T_m)\Delta t} \quad (4.2)$$

donde \dot{Q}_{total} es la tranferencia de calor total calculada de la pared caliente al PCM durante un intervalo de tiempo de un segundo (Δt), ya que la toma de datos de

temperatura tiene esa frecuencia de obtención de datos. Finalmente, con éste último valor, es posible calcular el número de Nu promedio, gracias a la siguiente ecuación:

$$Nu(t) = \frac{h(t)H}{k_l} \quad (4.3)$$

donde H es la longitud característica que es la altura de la cavidad.

Con este procedimiento, es posible obtener los valores del número de Nusselt a lo largo de todo el proceso de fusión. En la Fig. 4.14 podemos observar el número de Nusselt en todo el cambio de fase para ambas sustancias. Omitiendo los tiempos de fusión, discutido en la sección anterior, vemos como la gráfica de la solución de agua con EG se ve que la transferencia de calor se sostiene sin variaciones demasiado notables, obteniendo un número de Nusselt máximo al rededor de 10 en toda la prueba, mientras que en la solución de agua con NaCl su número de Nusselt máximo es aproximadamente el doble. Esto nos dice que la suma de los efectos térmicos de las propiedades termofísicas de la solución salina es casi el doble que los efectos de la solución con glicol, así como su tiempo de fusión total. También podemos observar como ambas pruebas tienen un incremento del número de Nusselt entre el 40% al 60% de su tiempo de fusión total, lo que nos indica, como en la aproximación numérica, que en esa etapa, se encuentra la velocidad máxima lo que influye a una transferencia de calor más intensa.

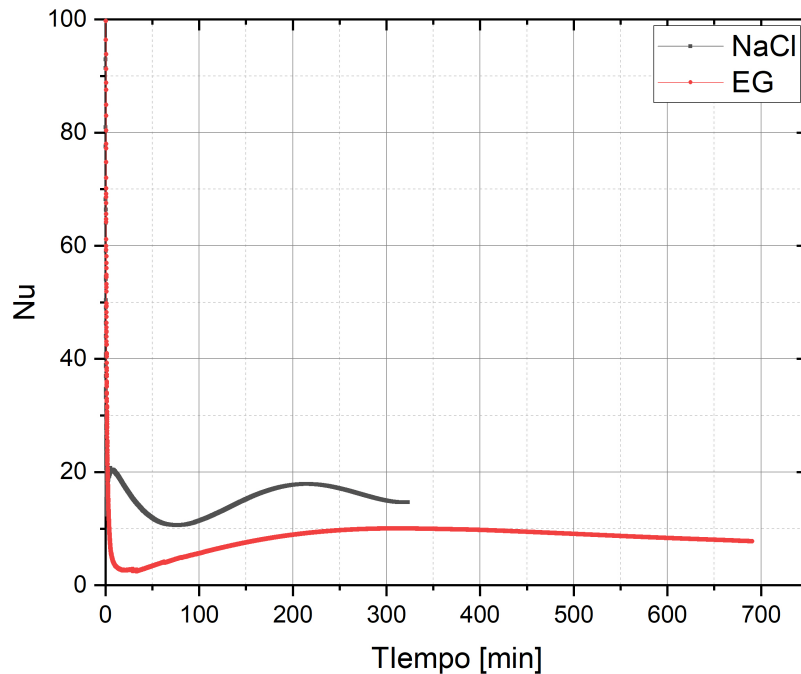


Figura 4.14: Número de Nusselt promedio obtenido en la prueba experimental de transferencia de calor para el agua con EG a 30.5 % y agua con NaCl al 18.8 %.

Para analizar la transferencia de calor en ambas soluciones, es importante realizar la comparación de sus propiedades termofísicas, pero también de los números característicos del fenómeno de transferencia de calor, por lo que se procedera a definir y calcular los números adimensionales pertinentes.

Como se mencionó antes, el número de Ra es el producto del número de Grashof, el cual describe una medida de la relación entre las fuerzas de flotación y las fuerzas viscosas actuando en el fluido, y el número de Prandtl, el cual describe una medida de relación de efectividad de la cantidad de movimiento y el transporte de energía por medio de difusión viscosa y difusión térmica, respectivamente. Por lo tanto, el Ra se puede observar como la relación entre las fuerzas de flotación y las difusividades térmicas y de cantidad de movimiento. Para el cálculo del número de Ra, se utilizaron las siguientes ecuaciones:

$$Gr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)H^3}{\nu^2} \quad (4.4)$$

$$Ra = GrPr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)H^3}{\nu\alpha} \quad (4.5)$$

donde,

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \quad (4.6)$$

Para la solución salina tenemos un número de Ra de 166×10^6 y para la solución con glicol un número de Ra de 73×10^6 , por lo que la solución salina presenta fuerzas de flotación mayores que las del Etilenglicol, lo que significa que las fuerzas de flotación tienen un mayor efecto en el fenómeno de convección natural que la misma difusividad térmica del material. Al realizar un análisis de la diferencia de propiedades termofísicas del agua con NaCl respecto al agua con EG, se observa que la densidad es 10 % mayor, la viscosidad dinámica es 78 % menor, la conductividad térmica es 23 % mayor y 39 % mayor en la expansión térmica volumétrica, esto hace que exista un efecto mayor para generar un nivel de convección natural más intenso que la solución con EG, lo que desencadena a su vez, un posible campo de velocidades más intenso y por lo tanto, una rapidez de fusión más veloz y eficaz.

En la Tabla 4.1 se puede observar la diferencia de las propiedades termofísicas promediadas de los dos límites de temperatura de la prueba experimental (i.e., -15°C y 0°C) y la comparación de los números característicos de la convección natural entre ambas sustancias.

Parámetro	Agua con EG	Agua con NaCl	Unidad	Porcentaje
ρ	1 046.8	1 148.7	kg/m ³	10 %
C_p	3 631.2	3 401.9	J/kg·K	-6 %
k	0.4392	0.5414	W/kg·m	23 %
μ	0.00595	0.00334	Pa·s	-78 %
Gr	1 487 575	7 923 375	–	433 %
Pr	49.24	20.97	–	-135 %
α	1.155×10^{-7}	1.385×10^{-7}	–	20 %
Ra	73 249 798	166 160 126	–	127 %
Nu_{max}	10.4	18.7	–	80 %

Tabla 4.1: Propiedades termofísicas y números característicos adimensionales de ambas soluciones.

4.2.3 CAMPO DE VELOCIDADES

Campos de velocidades instantáneos fueron capturados y calculados para ambos PCMs, agua con EG al 30.5 % y agua con NaCl al 18.8 %. Los parámetros para la obtención de los resultados y el método de solución fueron descritos en la metodología.

En la Fig. 4.15 se muestra un resultado preliminar de cómo se obtendrían los resultados de las pruebas reales. La condición para esta prueba es que la cavidad no se encuentra aislada, siendo expuesto a un ambiente promedio de 25°C y un sumidero de calor en la pared izquierda con un ambiente a 5°C en un tiempo de estabilización de aproximadamente 30 minutos. Como se puede observar, los vectores de velocidad realizan una recirculación en toda la cavidad en sentido esperado: el fluido cercano a la pared fría se encuentra moviéndose hacia abajo, mientras que el otro extremo asciende. Esto debido a las fuerzas de flotación ocurridas bajo convección natural. Con esta prueba podemos asegurar que nuestra adquisición de vectores de velocidad

no tendrá problemas para las pruebas reales.

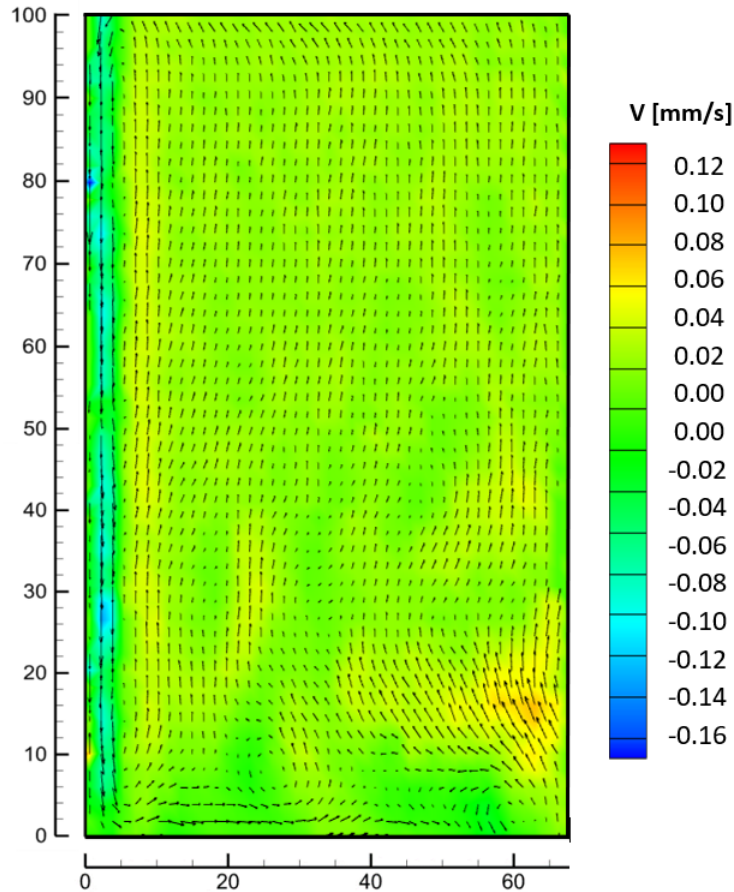


Figura 4.15: Prueba de resultado de campo de velocidades con agua

Para el caso de agua con EG, podemos observar en la Fig. 4.16 la obtención del campo de velocidades a las 6 horas del proceso de fusión. Se decidió mostrar este tiempo debido a que así se observa, en promedio, el resultado del campo de velocidades. Como podemos ver, los vectores tienden a moverse sin algún comportamiento esperado, por ejemplo, en la parte inferior vemos que el fluido cercano a la interfase sólido-líquido se desliza hacia la derecha, lo cual es esperado, sin embargo también el fluido en la parte inferior también se desliza hacia la derecha, lo cual se esperaría en sentido contrario. Debido a esto si mostrásemos más imágenes, veríamos comportamientos caóticos también. Pero es posible obtener la velocidad máxima de todas las pruebas obtenidas, la cual es de 0.0262mm/s, la cual usaremos para discutir mas

adelante.

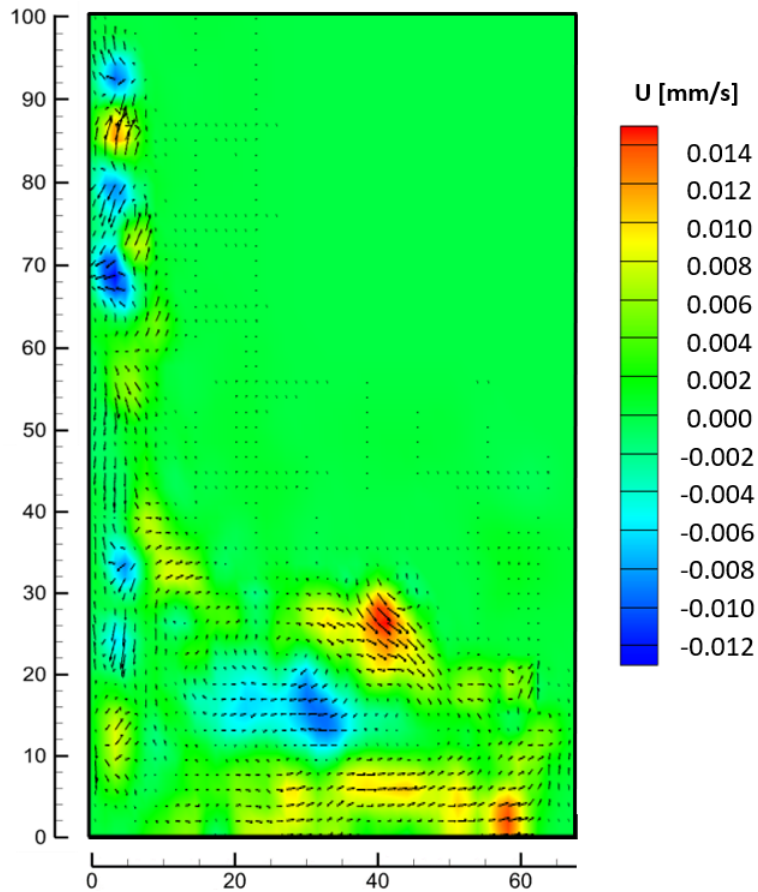


Figura 4.16: Campo de velocidades instantáneo de la solución agua con EG a 6 horas del proceso de fusión

Para el caso de agua con NaCl, en la Fig. 4.17 se observa su campo de velocidades a las 3 horas del proceso de fusión. Imágenes capturadas tiempo antes de esta toma no se analizaron, debido a que existía una capa de fluido muy angosta y no podían apreciarse muchas partículas en movimiento. Para la captura en este tiempo, podemos observar como va generando unas líneas de corriente en la parte intermedia de la cavidad, donde logran apreciarse 4 líneas de corriente que van generando un pequeño zigzag, mientras que en otros materiales de cambios de fase en la intersección líquido-sólido, el fluido recorre naturalmente esta interfase sin generar este tipo de corrientes. La velocidad máxima medida en este proceso es de 0.058 mm/s.

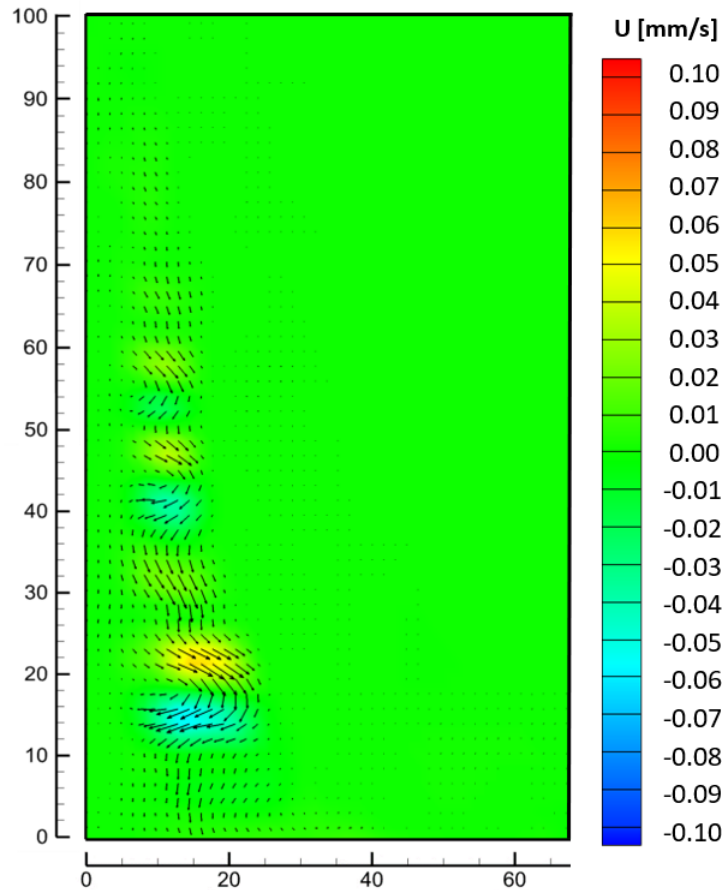


Figura 4.17: Campo de velocidades instantáneo de la solución agua con NaCl a 3 horas del proceso de fusión

En la Fig. 4.18 se muestra el campo de velocidades en el instante de tiempo de 3 horas con 30 minutos observamos un movimiento totalmente inesperado, estas mismas 4 líneas de corriente se encuentran dentro de un comportamiento similar a las celdas de convección. Estas 4 corrientes se han convertido en 4 recirculaciones dentro del proceso de cambio de fase. Este comportamiento no se observó en la experimentación de agua con EG, ni mucho menos se ha observado en experimentaciones de cambio de fase con otros materiales, esto podría deberse al gradiente de concentración que tiene el cloruro de sodio a la solución. La velocidad máxima medida en este proceso es de 0.12mm/s.

En el trabajo de Chen y Liu [11] presentan una investigación donde observan

mediante una simulación numérica, cómo un dominio de fluido con concentraciones de sal diferentes en la altura de una cavidad, genera líneas de corriente estratificadas por los gradientes de salinidad en ella, generando así una doble difusión convectiva debido a las capas estratificadas de sal en la cavidad. Esto nos da un mayor panorama que estas recirculaciones (a partir de ahora llamadas estratificaciones de corriente) son una característica de las soluciones salinas, mejorando la difusión de calor.

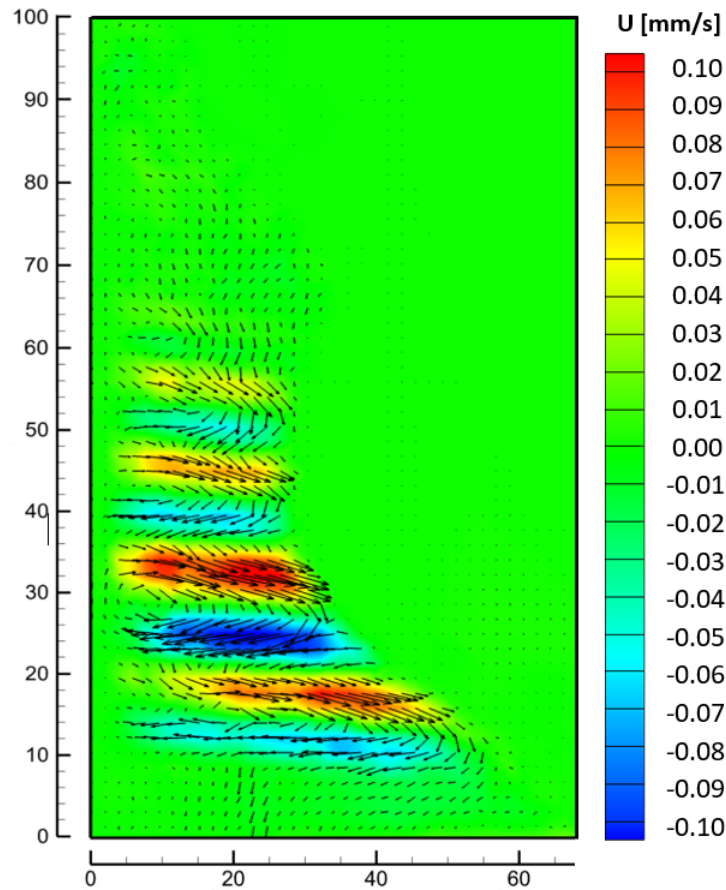


Figura 4.18: Campo de velocidades instantáneo de la solución agua con NaCl a 3 horas y 30 minutos del proceso de fusión

En la Fig. 4.19 se observa de 30 minutos después de la última captura, comienza a cesar la intensidad de la magnitud de la velocidad en la convección natural del fluido, estas mismas 4 estratificaciones de corriente siguen apreciándose pero con una menor intensidad. Sin embargo podemos ver que la fracción líquida ha evolucionado

grandemente en este instante de tiempo de 4 horas. La velocidad máxima es de 0.105mm/s

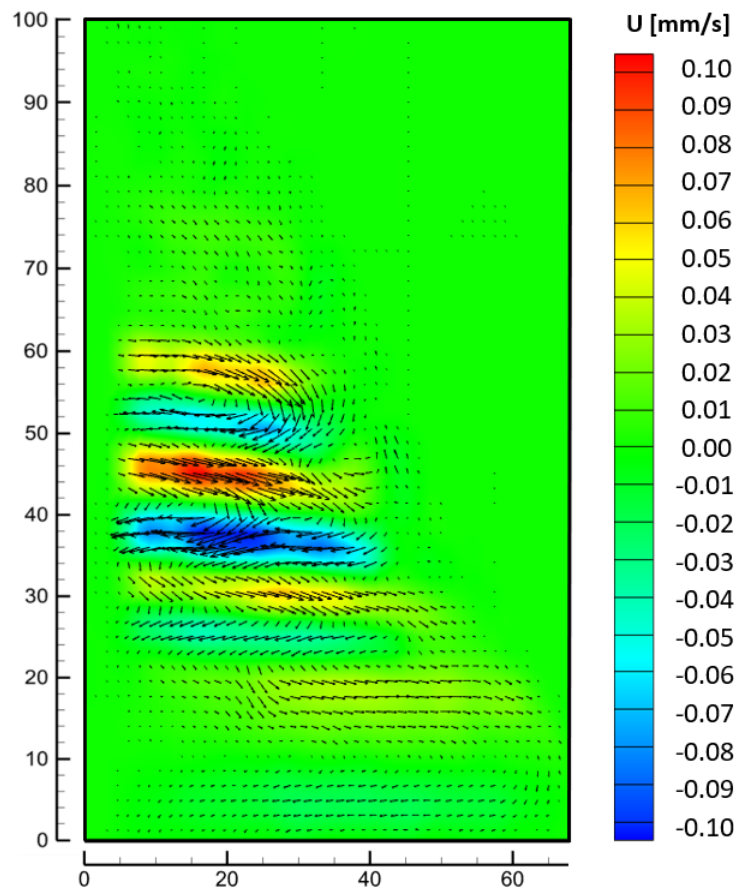


Figura 4.19: Campo de velocidades instantáneo de la solución agua con NaCl a 4 horas del proceso de fusión

Posteriormente, las siguientes imágenes que se capturaron muestran un cese de la velocidad, y en aproximadamente 5 horas la fusión está completa.

Estas estratificaciones de corriente también son explicadas de la siguiente manera. Incropera et. al. [25] nos brindan información con bastante precisión de este fenómeno que no había sido observado en un proceso de cambio de fase sólido a líquido. En la Fig. 4.20 podemos observar los siguientes casos de flujo en una placa inclinada: (a) vista lateral del flujo en la superficie superior e inferior de una placa fría ($T_s < T_\infty$), (b) vista del extremo superior del flujo en la superficie inferior de

la placa fría, (c) vista lateral del flujo en la superficie superior e inferior de una placa caliente ($T_s > T_\infty$), y (d) vista del extremo superior del flujo en la superficie superior de la placa caliente, donde T_s es la temperatura de la placa y T_∞ la temperatura del fluido. Este autor explica que en la parte inferior de una superficie fría inclinada (interfase sólido-líquido) la componente vertical de las fuerzas de flotación actúa moviendo el fluido, donde el desarrollo de la capa límite bajo la superficie es interrumpida por el desprendimiento de capas de líquido frío desde la superficie. El resultado es un flujo tridimensional, y como se muestra en el ancho de dicha placa en la Fig. 4.20 (b), el fluido frío es descargado desde la superficie inferior donde es reemplazado continuamente por un fluido más caliente del mismo dominio, generando una estratificación de corriente en el fluido, hasta que cesen las condiciones que hacen que este fenómeno ocurra.

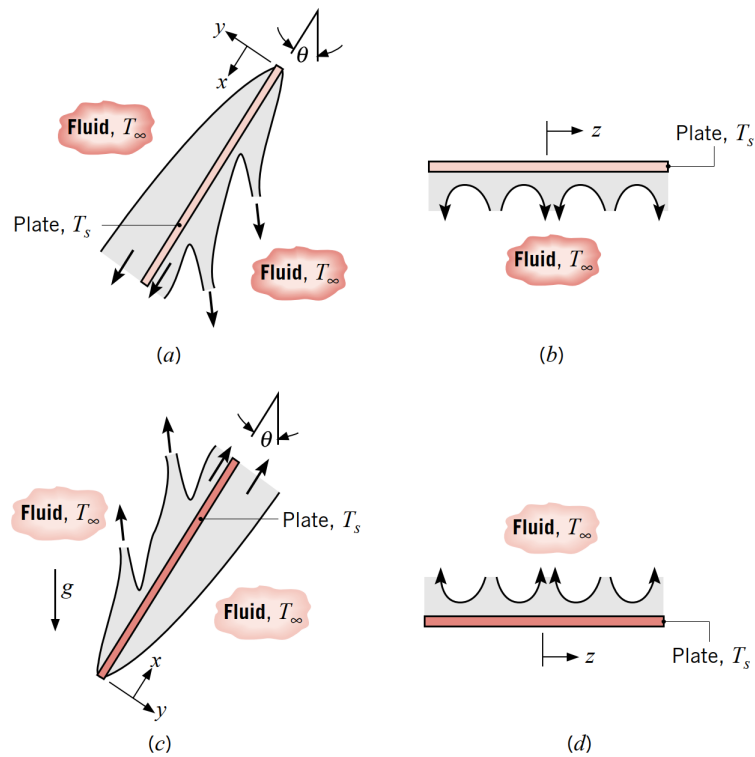


Figura 4.20: Flujos impulsados por flotabilidad en una placa inclinada.

Adicionado a esta explicación, encontramos que en el trabajo de Ramírez [58]

estudia el comportamiento de la estratificación térmica y de líneas de corriente en cavidades cerradas con condiciones isotérmicas y adiabáticas en sus paredes onduladas (semejante a esta investigación) en función de diversos parámetros como son el número de Rayleigh, relación de aspecto, longitud de onda de la pared, entre otros. En la Fig. 4.21 podemos observar uno de los resultados que la estratificación de las líneas de corriente en función de la longitud de onda de la pared ondulada, donde Λ es la longitud de onda Z la altura adimensional y r el ancho adimensional.

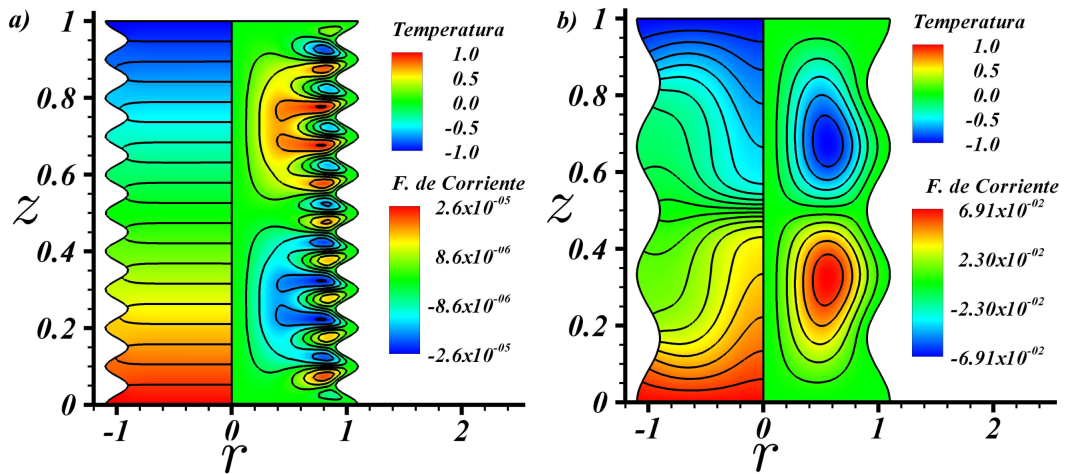


Figura 4.21: Contornos de temperatura y función de corriente para a) $\Lambda = 1/3$ y b) $\Lambda = 1/10$. Los demás parámetros son $Ra = 10^5$, $Pr = 7$.

En dicho trabajo podemos considerar dos resultados relevantes para nuestra investigación:

- Dos cavidades bajo las mismas condiciones, son simuladas y las que presentan una estratificación de corriente estable son las que tienen una baja relación de aspecto (geometría rectangular), longitud de onda pequeña (en la pared ondulada) y una amplitud de onda grande (en la pared ondulada). Estas tres condiciones presentadas asemejan cuando el PCM comienza a cambiar de fase (baja relación de aspecto) y la pared inclinada durante el proceso de cambio de fase (pared ondulada simulando una pared inclinada).

- Una simulación de convección natural de un fluido estado transitorio y considerando la transferencia de masa, se observa cómo en los primeros instantes el transporte de masa es más intenso que la transferencia de calor, dando lugar a estratificaciones de corriente.

La explicación mostrada sobre el desplazamiento de la capa límite de fluido frío por un fluido caliente y de la estratificación de la corriente por gradientes de concentración de la salmuera actúan en favor del incremento de la transferencia de calor por convección natural en el proceso de cambio de fase, mostrado también en una rapidez de fusión mayor de la solución de agua con NaCl que la solución de agua con EG, debido directamente no sólo a la diferencia entre sus propiedades térmicas, sino que ahora encontramos un nuevo fenómeno que sí ocurre en la solución salina y no pasa con la otra solución, la estratificación de líneas de corriente.

Para ello, es necesario también comparar las características térmicas de ambos fluidos, a través de sus números adimensionales presentados anteriormente en la tabla 4.1. En dicha tabla, encontramos que la principal diferencia en las propiedades termofísicas es la viscosidad, lo que hace que la salmuera tenga un campo de fluido sin tanta restricción en el movimiento que genera la convección natural, facilitando el intercambio de calor en la cavidad. Y esto lo podemos comprobar con el número de Rayleigh, dado que es mayor la salmuera que la solución con glicol, esto nos indica que hay mayores fuerzas de flotación en la salmuera lo que aporta, junto con lo que se comentó anteriormente, las estratificaciones de corriente observadas a lo largo de la interfase sólido-líquido en la Fig. 4.18.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES

Múltiples investigaciones han sido realizadas para el estudio experimental del proceso de fusión en PCMs con temperaturas superiores a los 20°C, caracterizando el comportamiento térmico y la dinámica de fluidos transitoria bajo el efecto de la convección natural mediante técnicas de visualización óptica PIV. En análisis recientes no se han encontrado comparaciones de diferentes PCMs y su efecto en la rapidez de fusión, mucho menos en temperaturas bajo cero, encontrando un área de oportunidad en el estudio de los PCMs que puede ser estudiada.

Es por ello que, en la presente investigación, el proceso de cambio de fase de diferentes PCMs, fue explorado numérica y experimentalmente bajo condiciones de temperatura de congelación, además la influencia de las propiedades termofísicas de dichas sustancias fue estudiado numérica y experimentalmente, junto con otros fenómenos de estratificación.

Dicha rapidez de fusión se rige por el fenómeno de transferencia de calor que, a su vez, depende directamente de las propiedades de las sustancias analizadas. Utilizando agua con EG al 30.5 %wt y agua con NaCl al 18.8 %wt como PCMs, y se encontró que existe una gran diferencia en el proceso de fusión para ambos materiales.

Para el análisis numérico, se utilizó un software comercial, donde el modelo

utilizado para simular el fenómeno de cambio de fase fue descrito por Voller. A pesar de que los resultados obtenidos en la simulación numérica fueron tomados en cuenta como una aproximación del fenómeno real, ya que una vez realizada la prueba experimental, se observó que el proceso de fusión se desarrolla de una forma más compleja. Este análisis preliminar facilitó la comprensión de lo que posteriormente se observó en los resultados experimentales, como lo son la importancia del campo de velocidades en el fenómeno de fusión y la relevancia del cálculo del número de Nusselt para caracterizar las etapas de transferencia de calor en el proceso transitorio de convección natural.

Dicha investigación incluyó la visualización del proceso de fusión para ambas soluciones por medio de capturas de imagen procesadas para determinar la cantidad de fracción líquida instantánea durante el cambio de fase. El resultado para el caso de agua con NaCl fue el de un tiempo de fusión total de aproximadamente 300 minutos, siendo la mitad del tiempo de fusión comparado con la solución de agua con EG, que su tiempo fue poco más de los 600 minutos, indicando que la salmuera tiene una mayor difusión térmica. Esto lo podemos comprobar por medio del número de Prandtl (ver Tabla 4.1), ya que como la salmuera tiene aproximadamente la mitad del valor del número de Prandtl que el glicol, significa que la difusividad térmica es más dominante en la salmuera que en el caso con glicol, siendo éste último dominado por la difusión viscosa, lo que impide el que la transferencia de calor sea mayor.

La adquisición de la distribución de la temperatura en un plano medio de la cavidad con ambos PCMs, permitió realizar el cálculo del número de Nusselt. El resultado de la transferencia de calor por convección en la solución salina, como se mencionó antes, es debido a que el número de Prandtl es menor, lo que repercute en el resultado que se puede observar en la Fig. 4.14, donde el número de Nusselt es cerca del 80 % mayor que el caso de agua con EG. Los números de Nusselt promedio máximo fue de 18.7 y 10.4 para la salmuera y el glicol, respectivamente. En comparación con otros estudios con sustancias diferentes (PCMs con puntos de fusión entre 30-50°C) bajo un gradiente de temperatura similar (15°C), el número promedio de

Nusselt ronda entre un valor de 20 y 30, más alto que el obtenido en este estudio. Sin embargo, se observó un incremento significativo de éste número entre el 20 % y 35 % del tiempo total de fusión, cuyo comportamiento es también observado en muchos estudios experimentales con PCMs. Sin embargo, cabe resaltar que las propiedades que mayor relevancia toman en el cálculo del número de Nusselt son el número de Prandtl y el número de Rayleigh, por lo cual podemos deducir que si el Pr es menor y el Ra es mayor, esto conducirá a una mayor transferencia de calor por convección natural.

También fue comprobado que el modo dominante de transferencia de calor es la conducción en una etapa temprana al comienzo del proceso de fusión, debido a que la transferencia de calor es muy alta en estos primeros instantes del proceso, el cual es seguido por una segunda etapa de transición donde la conducción comienza a ser dominada por convección, cuyo nombre es comúnmente llamado como un régimen mixto (conducción + convección). Posteriormente la convección natural toma una mayor relevancia mientras la llamada piscina de fusión comienza a expandirse a lo ancho de la cavidad en la parte inferior del dominio de fusión. Finalmente, la última etapa de transferencia de calor es una convección débil que comienza a manifestarse cuando el dominio de líquido alcanza el ancho de la cavidad, esto puede observarse en ambas experimentaciones, documentado también en la literatura, como se mostró en la Fig. 2.4.

Por último, se obtuvo la captura y medición del campo de velocidades en diferentes tiempos del proceso de fusión. Para el campo de velocidades de agua con EG, se crea un canal muy delgado entre la superficie izquierda en donde el gradiente de temperatura es muy intenso y provoca un comportamiento bastante inestable y transitorio, lo que genera que existan regiones en donde el fluido flote y otras que tiendan a caer, puesto que algunos vectores de velocidad se mueven en un sentido no esperado (región superior). En la región inferior, los gradientes de temperatura ya no son tan intensos, dado que la superficie caliente está bastante alejada dando lugar a que estas condiciones promuevan que la convección de calor sea transitoria pero

estable. Estas dos condiciones provocan que la forma en que se va fusionando el PCM genere esta interfase sólida-líquida irregular, cuyo comportamiento también está registrado en los procesos de fusión experimentales y por la literatura. La velocidad máxima capturada para el caso de EG en todo el proceso es de 0.0262 mm/s.

Para el caso de agua con NaCl ocurre un fenómeno de fusión bastante diferente y muy pocas veces explicado. Al principio de este proceso, se observa cómo el campo de fluido comienza bastante estable, sin embargo, conforme llega a su intensidad máxima, se observan cuatro corrientes estratificadas, este comportamiento no se observó en la experimentación de agua con EG, ni en otros estudios experimentales con diferentes PCMs, lo cual puede dar lugar a que la distribución no homogénea de la concentración de la solución salina en la cavidad sea uno de los causantes de estas cuatro celdas convectivas que mantienen su posición durante gran parte del proceso de fusión, cuyas capas de concentración salina pudieron ocurrir cuando la salmuera fue congelada, cuya concentración no pudiera quedar uniformemente distribuida y al momento de que se funda, da lugar a estas distribuciones de concentración aporten a las estratificaciones de corriente presentadas (celdas convectivas independientes). Su velocidad máxima fue de 0.12 mm/s.

También, lo anterior presenta una similitud al fenómeno que se observa en la parte inferior de una superficie inclinada fría, en donde, si la componente vertical de las fuerzas de flotación es bastante intensa, esto interrumpe la capa límite bajo la superficie y comienza un desprendimiento de porciones de líquido frío desde la superficie inferior el cual es desplazado por un fluido más caliente del mismo dominio, hasta que las condiciones del fenómeno permiten que cese este proceso. El resultado es un flujo tridimensional con una alta transferencia de calor, y éste, junto con el análisis de la diferencia del número de Prandtl, son los principales motivos del porqué el tiempo de fusión es casi la mitad que en el caso del glicol.

Sin embargo, son las propiedades termofísicas que toman la principal influencia en la convección natural dentro del proceso de fusión, ya que son las únicas que

pueden ser cuantificadas, siendo función de dos números importantes, el número de Prandtl y el número de Rayleigh, los cuales a su vez son relevantes y en función también del número de Nusselt.

Anteriormente, vimos cómo el número de Prandtl de la salmuera en comparación con el glicol es 135 % mayor, lo cual aporta en una gran diferencia en la transferencia de calor de ambos, sin embargo, es importante resaltar que la viscosidad aporta a esta variación en el frente de fusión, dado a que ésta es 78 % menor en la solución salina que en la solución con glicol, permitiendo que las fuerzas de flotación de la salmuera sean más dominantes que las fuerzas viscosas, tales que, el número de Grashoff, fuerzas de flotación entre las fuerzas viscosas, y el número de Rayleigh, fuerzas de flotación entre las difusividades térmicas y de cantidad de movimiento, llegan a ser cuatro y dos veces mayores que la solución de agua con glicol, respectivamente.

Por lo que se concluye que en orden descendente, la viscosidad tiene una mayor influencia en la rapidez de fusión de un PCM, dado que entre menor sea esta menor será el número de Prandtl y mayor el número de Rayleigh (mejorando la difusión térmica y las fuerzas de flotación, respectivamente), y posteriormente, si la conductividad térmica es mayor, el número de Rayleigh será mayor también y el número de Prandtl menor, y las que menos importancia tienen para ésta investigación, son la densidad y calor específico, ya que a pesar de que están dentro de las ecuaciones de los números adimensionales mencionados anteriormente, estos no tienen una gran variación en los dos PCMs, lo cual no toma una mayor importancia que los dos primeras propiedades termofísicas.

Finalmente, los resultados obtenidos en este estudio y sus comentarios han aportado en el campo de estudio del cambio de fase, particularmente en el cambio de fase en condiciones de temperaturas de congelación. Los PCMs utilizados en la experimentación son materiales comunes en el campo de la refrigeración, los cuales fueron utilizados para analizar la importancia que toman las propiedades termofísi-

cas de dichas sustancias en el desempeño del frente de fusión para el almacenamiento de energía. Por lo tanto, tomando en cuenta los resultados obtenidos, se pueden conseguir sistemas de conservación de alimentos más eficientes basados en PCMs para cualquier tipo de alimento, i.e. cualquier PCM cuyo punto de fusión que tenga sea la condición de temperatura a la cual se desea conservar cualquier tipo de producto, tomando en cuenta que sí se desea mantener isotérmicamente estable el alimento o sustancia, es necesario un PCM con frente de fusión más rápido (transferencia de calor más intensa) lo que permitiría absorber el calor del alimento mucho más rápido, no permitiendo que aumente su temperatura sino manteniéndola a la temperatura de fusión del PCM, por lo cual se recomienda que se utilice una sustancia de cambio de fase con propiedades termofísicas semejante a la mezcla de agua con NaCl para lograr dicho objetivo.

Para un correcto análisis numérico comparativo con la experimentación, se recomiendan las siguientes consideraciones:

- Considerar en el modelo numérico los cambios de densidades en estado sólido y líquido de los PCMs.
- Considerar en el modelo numérico la estratificación y gradientes de concentración en el caso de la solución salina.
- Tener en cuenta la transferencia de calor que tiene el material de encapsulamiento del PCM.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] «Se requiere plan maestro de Transporte Para Evitar Desperdicio de Alimentos - Transporte en México: Empresas de Transporte de Carga», Visitado el: 08/01/2023, Jun 2015, URL <https://transporte.mx/se-requiere-plan-maestro-de-transporte-para-evitar-desperdicio-de-alimentos/>.
- [2] ADRIAN, R. J., «Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics», *Annual review of fluid mechanics*, **23**(1), págs. 261–304, 1991.
- [3] ANSYS, I., «ANSYS fluent UDF manual», *ANSYS, Inc., Canonsburg, PA*, 2015.
- [4] ASHRAE., *2018 ASHRAE handbook: Fundamentals*, ASHRAE, 2018.
- [5] BEJAN, A., *Convection heat transfer*, John wiley & sons, 2013.
- [6] BELL, I. H., J. WRONSKI, S. QUOILIN y V. LEMORT, «Pure and pseudo-pure fluid thermophysical property evaluation and the open-source thermophysical property library CoolProp», *Industrial & engineering chemistry research*, **53**(6), págs. 2498–2508, 2014.
- [7] BRUNO, F., M. BELUSKO, M. LIU y N. H. S. TAY, «Using solid-liquid phase change materials (PCMs) in thermal energy storage systems», , págs. 201–246, 2015.
- [8] BÉNARD, C., D. GOBIN y F. MARTINEZ, «Melting in rectangular enclosures: experiments and numerical simulations», , 1985.

- [9] CABEZA, L. F., A. CASTELL, C. BARRENECHE, A. DE GRACIA y A. I. FERNÁNDEZ, «Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **15**(3), págs. 1675–1695, 2011.
- [10] CHEN, Q., Y. ZHANG y M. YANG, «An Interfacial Tracking Model for Convection-Controlled Melting Problems», *Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals*, **59**(3), págs. 209–225, 2011.
- [11] CHEN, Y.-M. y C.-K. LIU, «Double-diffusive convection for a heated cylinder submerged in a salt-stratified fluid layer», *Heat and mass transfer*, **33**, págs. 17–26, 1997.
- [12] CHENG, W.-L., B.-J. MEI, Y.-N. LIU, Y.-H. HUANG y X.-D. YUAN, «A novel household refrigerator with shape-stabilized PCM (Phase Change Material) heat storage condensers: An experimental investigation», *Energy*, **36**(10), págs. 5797–5804, 2011.
- [13] DU, K., J. CALAUTIT, Z. WANG, Y. WU y H. LIU, «A review of the applications of phase change materials in cooling, heating and power generation in different temperature ranges», *Applied energy*, **220**, págs. 242–273, 2018.
- [14] ELSAYED, A. O., «Numerical study of ice melting inside rectangular capsule under cyclic temperature of heat transfer fluid», *Energy Conversion and Management*, **48**(1), págs. 124–130, 2007.
- [15] FARID, M. M., A. M. KHUDHAIR, S. A. K. RAZACK y S. AL-HALLAJ, «A review on phase change energy storage: materials and applications», *Energy Conversion and Management*, **45**(9-10), págs. 1597–1615, 2004.
- [16] GANDHI, M. S., M. J. SATHE, J. B. JOSHI y P. K. VIJAYAN, «Two phase natural convection: CFD simulations and PIV measurement», *Chemical Engineering Science*, **66**(14), págs. 3152–3171, 2011.

- [17] GASIA, J., L. MIRÓ, A. DE GRACIA, C. BARRENECHE y L. CABEZA, «Experimental Evaluation of a Paraffin as Phase Change Material for Thermal Energy Storage in Laboratory Equipment and in a Shell-and-Tube Heat Exchanger», *Applied Sciences*, **6**(4), pág. 112, 2016.
- [18] GIN, B. y M. M. FARID, «The use of PCM panels to improve storage condition of frozen food», *Journal of Food Engineering*, **100**(2), págs. 372–376, 2010.
- [19] GIN, B. y M. M. FARID, «The use of PCM panels to improve storage condition of frozen food», *Journal of Food Engineering*, **100**(2), págs. 372–376, 2010.
- [20] GREEN, D. W. y M. Z. SOUTHARD, *Perry's chemical engineers' handbook*, McGraw-Hill Education, 2019.
- [21] GÜNTHER, E., L. HUANG, H. MEHLING y C. DÖTSCH, «Subcooling in PCM emulsions – Part 2: Interpretation in terms of nucleation theory», *Thermochimica Acta*, **522**(1-2), págs. 199–204, 2011.
- [22] HO, C.-J. y R. VISKANTA, «Heat transfer during melting from an isothermal vertical wall», , 1984.
- [23] HUANG, L., E. GÜNTHER, C. DOETSCH y H. MEHLING, «Subcooling in PCM emulsions—Part 1: Experimental», *Thermochimica Acta*, **509**(1-2), págs. 93–99, 2010.
- [24] INC., A., «ANSYS FLUENT 12.0/12.1 Documentation», , 2020.
- [25] INCROPERA, F. P. y D. P. DEWITT, *Fundamentos de transferencia de calor*, Pearson Educación, 1999.
- [26] IRANAGH, S. A., A. R. TAHAVVOR, M. YAGHOUBI y M. M. TAVAKOL, «Experimental and numerical investigation of frost formation on an array of square fins under natural convection condition», *International Communications in Heat and Mass Transfer*, **127**, pág. 105 556, 2021.

- [27] IZGI, B. y M. ARSLAN, «Numerical analysis of solidification of PCM in a closed vertical cylinder for thermal energy storage applications», *Heat and Mass Transfer*, **56**(10), págs. 2909–2922, 2020.
- [28] JEVNIKAR, S. y K. SIDDIQUI, «The Influence of Heat Source Orientation on PCM Flow Behavior During Phase Transition», en *Fluids Engineering Division Summer Meeting*, tomo 51562, American Society of Mechanical Engineers, pág. V002T16A006.
- [29] JEVNIKAR, S. y K. SIDDIQUI, «Investigation of the influence of heat source orientation on the transient flow behavior during PCM melting using particle image velocimetry», *Journal of Energy Storage*, **25**, pág. 100 825, 2019.
- [30] JOULIN, A., Z. YOUNSI, L. ZALEWSKI, D. R. ROUSSE y S. LASSUE, «A numerical study of the melting of phase change material heated from a vertical wall of a rectangular enclosure», *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, **23**(7), págs. 553–566, 2009.
- [31] JUNG, U.-H., J.-H. KIM, J.-H. KIM, J.-H. PECK, C.-D. KANG y Y.-S. CHOI, «Numerical investigation on the melting of circular finned PCM system using CFD & full factorial design», *Journal of Mechanical Science and Technology*, **30**(6), págs. 2813–2826, 2016.
- [32] K, R. M. y B. JYOTIRMAY, «Development of Correlation for Melting Time of Phase Change Material in Latent Heat Storage Unit», *Energy Procedia*, **75**, págs. 2125–2130, 2015.
- [33] KAMKARI, B. y H. SHOKOUHMAND, «Experimental investigation of phase change material melting in rectangular enclosures with horizontal partial fins», *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **78**, págs. 839–851, 2014.
- [34] KAMKARI, B., H. SHOKOUHMAND y F. BRUNO, «Experimental investigation of the effect of inclination angle on convection-driven melting of phase change

- material in a rectangular enclosure», *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **72**, págs. 186–200, 2014.
- [35] KHEIRABADI, A. C. y D. GROULX, «The Effect of the Mushy-Zone Constant on Simulated Phase Change Heat Transfer», , pág. 22, 2015.
- [36] KUMANO, H., T. ASAOKA, A. SAITO y S. OKAWA, «Study on latent heat of fusion of ice in aqueous solutions», *International Journal of Refrigeration*, **30**(2), págs. 267–273, 2007.
- [37] LEDUCQ, D., F. NDOYE y G. ALVAREZ, «Phase change material for the thermal protection of ice cream during storage and transportation», *International Journal of Refrigeration*, **52**, págs. 133–139, 2015.
- [38] LEDUCQ, D., F. T. NDOYE y G. ALVAREZ, «Phase change material for the thermal protection of ice cream during storage and transportation», *International Journal of Refrigeration*, **52**, págs. 133–139, 2015.
- [39] LEUNGTONGKUM, T., D. FLICK, H. M. HOANG, D. STEVEN, A. DELAHAYE y O. LAGUERRE, «Insulated box and refrigerated equipment with PCM for food preservation: State of the art», *Journal of Food Engineering*, **317**, pág. 110 874, 2022.
- [40] LI, Y.-C. M. y Y.-H. A. CHEN, «Assessing the thermal performance of three cold energy storage materials with low eutectic temperature for food cold chain», *Energy*, **115**, págs. 238–256, 2016.
- [41] LI, Z., M. YANG y Y. ZHANG, «A Hybrid Lattice Boltzmann and Finite-Volume Method for Melting with Convection», *Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals*, **66**(4), págs. 307–325, 2014.
- [42] LIN, Y., Y. JIA, G. ALVA y G. FANG, «Review on thermal conductivity enhancement, thermal properties and applications of phase change materials in thermal energy storage», *Renewable and sustainable energy reviews*, **82**, págs. 2730–2742, 2018.

- [43] LIU, A., J. LIN y Y. ZHUANG, «PIV experimental study on the phase change behavior of phase change material with partial filling of metal foam inside a cavity during melting», *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **187**, pág. 122 567, 2022.
- [44] LIU, Z., X. ZHANG, H. WANG, S. MENG y S. CHENG, «Influences of surface hydrophilicity on frost formation on a vertical cold plate under natural convection conditions», *Experimental Thermal and Fluid Science*, **31**(7), págs. 789–794, 2007.
- [45] MARTINEZ, I., «Properties of some particular solutions», *Universidad Politécnica de Madrid*, 2015.
- [46] MEHLING, H. y L. F. CABEZA, «Heat and cold storage with PCM», *Heat and mass transfer*, págs. 11–55, 2008.
- [47] MELONE, L., L. ALTOMARE, A. CIGADA y L. DE NARDO, «Phase change material cellulosic composites for the cold storage of perishable products: From material preparation to computational evaluation», *Applied energy*, **89**(1), págs. 339–346, 2012.
- [48] MORGAN, K., «A numerical analysis of freezing and melting with convection», *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, **28**(3), págs. 275–284, 1981.
- [49] NIE, B., A. PALACIOS, B. ZOU, J. LIU, T. ZHANG y Y. LI, «Review on phase change materials for cold thermal energy storage applications», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **134**, pág. 110 340, 2020.
- [50] OMARA, A. A. M. y A. A. M. MOHAMMEDALI, «Thermal management and performance enhancement of domestic refrigerators and freezers via phase change materials: A review», *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, **66**, pág. 102 522, 2020.

- [51] ORÓ, E., A. DE GRACIA, A. CASTELL, M. M. FARID y L. F. CABEZA, «Review on phase change materials (PCMs) for cold thermal energy storage applications», *Applied Energy*, **99**, págs. 513–533, 2012.
- [52] ORÓ, E., L. MIRÓ, M. M. FARID y L. F. CABEZA, «Improving thermal performance of freezers using phase change materials», *International Journal of Refrigeration*, **35**(4), págs. 984–991, 2012.
- [53] ORÓ, E., L. MIRÓ, M. M. FARID y L. F. CABEZA, «Thermal analysis of a low temperature storage unit using phase change materials without refrigeration system», *International Journal of Refrigeration*, **35**(6), págs. 1709–1714, 2012.
- [54] PATANKAR, S., *Numerical heat transfer and fluid flow*, Taylor & Francis, 1980.
- [55] PAUL, D., C. IONESCU y H. NECULA, «Study of thermal energy storage using phase change materials», en *2017 International Conference on Energy and Environment (CIEM)*, IEEE, págs. 162–166.
- [56] QURESHI, Z. A., H. M. ALI y S. KHUSHNOOD, «Recent advances on thermal conductivity enhancement of phase change materials for energy storage system: a review», *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **127**, págs. 838–856, 2018.
- [57] RAFFEL, M., C. E. WILLERT y J. KOMPENHANS, *Particle image velocimetry: a practical guide*, tomo 2, Springer, 2018.
- [58] RAMÍREZ HERNÁNDEZ, H. G., *Convección natural de calor y masa en una cavidad cilíndrica con paredes onduladas*, Tesis Doctoral, Universidad Autónoma de Nuevo León, 2011.
- [59] ROSTAMI, S., M. AFRAND, A. SHAHSAVAR, M. SHEIKHOLESAMI, R. KALBASI, S. AGHAKHANI, M. S. SHADLOO y H. F. OZTOP, «A review of melting and freezing processes of PCM/nano-PCM and their application in energy storage», *Energy*, **211**, pág. 118 698, 2020.

- [60] SÁNCHEZ CRUZ, F., S. MARTÍNEZ MARTÍNEZ, H. RAMÍREZ HERNÁNDEZ y S. MÉNDEZ DÍAZ, «Thermal Convection in a Cylindrical Enclosure with Wavy Sidewall», en *Selected Topics of Computational and Experimental Fluid Mechanics*, Springer, págs. 395–411, 2015.
- [61] SARBU, I. y C. SEBARCHIEVICI, «A Comprehensive Review of Thermal Energy Storage», *Sustainability*, **10**(1), pág. 191, 2018.
- [62] SCIACCHITANO, A., «Uncertainty quantification in particle image velocimetry», *Measurement Science and Technology*, **30**(9), pág. 092 001, 2019.
- [63] SHARMA, A., V. V. TYAGI, C. R. CHEN y D. BUDDHI, «Review on thermal energy storage with phase change materials and applications», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **13**(2), págs. 318–345, 2009.
- [64] SHIH, Y.-C. y S.-M. TU, «PIV study on the development of double-diffusive convection during the solidification effected by lateral cooling for a super-eutectic binary solution», *Applied Thermal Engineering*, **29**(14-15), págs. 2773–2782, 2009.
- [65] SHOKOUHMAND, H. y B. KAMKARI, «Experimental investigation on melting heat transfer characteristics of lauric acid in a rectangular thermal storage unit», *Experimental Thermal and Fluid Science*, **50**, págs. 201–212, 2013.
- [66] SPARROW, E. M., S. PATANKAR y S. RAMADHYANI, «Analysis of melting in the presence of natural convection in the melt region», , 1977.
- [67] TAO, Y. B. y Y.-L. HE, «A review of phase change material and performance enhancement method for latent heat storage system», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **93**, págs. 245–259, 2018.
- [68] VOGEL, J. y D. BAUER, «Phase state and velocity measurements with high temporal and spatial resolution during melting of n-octadecane in a rectangular enclosure with two heated vertical sides», *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **127**, págs. 1264–1276, 2018.

- [69] VOLLER, V. y C. SWAMINATHAN, «General Source-Based Method for Solidification Phase Change», *Numerical Heat Transfer, (Part B)*, págs. 175–189, 1991.
- [70] VOLLER, V. R. y C. PRAKASH, «A fixed grid numerical modelling methodology for convection-diffusion mushy region phase-change problems», *International journal of heat and mass transfer*, **30**(8), págs. 1709–1719, 1987.
- [71] VOLLER, V. R. y C. R. SWAMINATHAN, «General Source-Based Method for Solidification Phase Change», *Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals*, **19**(2), págs. 175–189, 1991.
- [72] WANG, S., A. FAGHRI y T. L. BERGMAN, «Numerical Modeling of Alternate Melting and Solidification», *Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals*, **58**(6), págs. 393–418, 2010.
- [73] WANG, Y., A. AMIRI y K. VAFAI, «An experimental investigation of the melting process in a rectangular enclosure», *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **42**(19), págs. 3659–3672, 1999.
- [74] YATSENKO, O. y I. CHUDOTVORTSEV, «Ice melting and crystallization in binary water–salt systems», *Inorganic materials*, **38**, págs. 907–913, 2002.
- [75] YOUNSI, Z. y H. NAJI, «A numerical investigation of melting phase change process via the enthalpy-porosity approach: Application to hydrated salts», *International Communications in Heat and Mass Transfer*, **86**, págs. 12–24, 2017.
- [76] ZALBA, B., J. M. MARIN, L. F. CABEZA y H. MEHLING, «Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications», *Applied thermal engineering*, **23**(3), págs. 251–283, 2003.
- [77] ZENG, L., J. LU, Y. LI, W. LI, S. LIU y J. ZHU, «Numerical study of the influences of geometry orientation on phase change material’s melting process», *Advances in Mechanical Engineering*, **9**(10), pág. 168781401772008, 2017.

-
- [78] ZHANG, Y., Z. CHEN, Q. WANG y Q. WU, «Melting in an enclosure with discrete heating at a constant rate», *Experimental thermal and fluid science*, **6**(2), págs. 196–201, 1993.
- [79] ZHAO, C. Y. y Z. G. WU, «Heat transfer enhancement of high temperature thermal energy storage using metal foams and expanded graphite», *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **95**(2), págs. 636–643, 2011.
- [80] ZHUANG, Y., Z. LIU y W. XU, «Effects of gradient porous metal foam on the melting performance and energy storage of composite phase change materials subjected to an internal heater: A numerical study and PIV experimental validation», *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **183**, pág. 122 081, 2022.
- [81] ZIVKOVIC, B. y I. FUJII, «An analysis of isothermal phase change of phase change material within rectangular and cylindrical containers», *Solar energy*, **70**(1), págs. 51–61, 2001.
- [82] ZONGQIN, Z. y A. BEJAN, «The problem of time-dependent natural convection melting with conduction in the solid», *International journal of heat and mass transfer*, **32**(12), págs. 2447–2457, 1989.

RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO

Jonathan Isaí López García

Candidato para obtener el grado de
Maestría en Ciencias de la Ingeniería
con Orientación en Energías Térmica y Renovable

Universidad Autónoma de Nuevo León
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

Tesis:

EFEECTO DE LA VARIACIÓN DE LAS PROPIEDADES TERMOFÍSICAS
EN PCMS SOBRE LA RAPIDEZ DE FUSIÓN DENTRO DE CAVIDADES
CERRADAS BAJO CONDICIONES DE TEMPERATURA DE
CONGELACIÓN USANDO PIV

Nací y he radicado en Monterrey, Nuevo León desde el año 1995. Mis padres son Santos López Anguiano (59) y Laurentina García Rivera (61). Entré a estudiar la carrera de Ingeniería en Aeronáutica en el año 2013, culminando dichos estudios en el año 2018 y recibiendo el título de Ingeniero en Aeronáutica en el año 2019. Durante mis estudios profesionales fundé y lideré AXIOS Aerodesign en el año 2017, un equipo que actualmente participa en competencias llamadas "SAE Aerodesign", donde se diseñan y manufacturan aeronaves RC a escala con diferentes misiones y objetivos. Mi experiencia profesional se conformó por dos años como Practicante de

Ingeniería en la industria automotriz (Nemak y NORMA Group) mientras estudiaba y posteriormente, un año como Ingeniero de Esfuerzos en la industria energética (KBR). Actualmente me encuentro ejerciendo la profesión como Ingeniero de Diseño en Sistemas de Fluidos para la compañía GE Aerospace en Querétaro, Querétaro.